

基于 T-MPLS 网络的多等级分组业务传送特性研究^①曹 畅^② 张永军 陈 瑞 黄善国 张 杰 顾晓仪

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要 基于国际电信联盟制定的传送多协议标记交换(T-MPLS)标准,在 T-MPLS 网络中电路业务和分组业务并存的情况下,对业务开关时间和数据包长服从帕雷托、对数正态、威布尔和指数分布的多等级分组业务传送质量进行了研究。理论分析表明,电路业务在边缘节点适配时被切割成的数据包的长度以及以业务源开关时间及分组数据包长分布为代表的流量特性,会对高等级分组业务的时延及其方差、路由器出端口处的队列长度和丢包率造成不同程度的影响。通过基于 OPNET 软件搭建的软件平台进行仿真,验证了理论分析的结论。

关键词 传送多协议标记交换(T-MPLS), 电路业务, 分组业务, 自相似性

0 引 言

传送多协议标记交换(transport multi-protocol label switching, T-MPLS)是国际电信联盟于 2006 年提出的一种分组传送技术,并在 2008 年发展成为 MPLS-TP(transport profile)技术。该技术能够提供类似于同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)的运营维护功能,并对以太网(Ethernet)、IP 和时分复用(time division multiplexing, TDM)等更多种类的业务具有良好的承载能力^[1-3]。与运营商对传统承载网络的要求相类似,T-MPLS 网络也必须考虑在多业务并存的情况下,以 TDM 业务为代表的传统电路业务对分组业务时延和抖动的影响,以及不同分组业务的发生特性对自身服务质量的影响。本文从以上两个方面出发,分析了电路业务的切割包长和分组业务的流量特征,从而为保障 T-MPLS 网络的多业务传送性能提供了理论依据。

1 电路业务封装包长对分组业务的影响

与传统的 SDH 传送网不同,T-MPLS 网络对电路业务的传送是基于统计复用的分组交换技术,即对 TDM 码流进行分组切割和伪线封装之后采用恒定速率数据包的方式进行^[4],所以有必要考察不同

的 TDM 数据包长对其他业务传输性能的影响。根据参考文献[5,6]中对分组业务的时延分析,业务的时延主要集中在路由器的排队等待和处理部分,与路由器的队列调度算法和链路带宽有关。鉴于运行管理维护(operation administration maintenance, OAM)功能对网络的正常运行至关重要,而话音等对时延和抖动要求极高的业务又通常采用 TDM 的适配方式,所以 OAM 和 TDM 业务必须优先于其他分组业务进行调度。就其他业务而言,可以按优先级的高低划分为加速转发(expedited forwarding, EF)业务、确保转发(assured forwarding, AF)业务和 Ethernet 业务,需要按照业务流量和彼此的权重采取不同的带宽预留策略,通过改进低延时排队(low latency queue, LLQ)^[7]的调度方式,设计调度器模型如下图 1 所示。

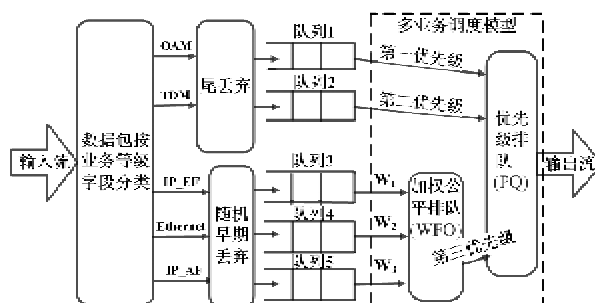


图 1 T-MPLS 路由器中的多业务调度模型

^① 863 计划(2007AA01Z2a4, 2009AA01Z218), 国家自然科学基金(60877052, 60702005)和教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0609)资助项目。

^② 男, 1984 年生, 博士生; 研究方向: 下一代网络中的流量控制; 联系人, E-mail: cxaobupt@gmail.com (收稿日期: 2009-05-11)

如图 1 所示,对到达路由器的 EF 业务、AF 业务和 Ethernet 业务,首先采用随机早期丢弃(random early drop, RED)算法进行拥塞控制。对已经存在于队列中的上述三种业务,在没有 TDM 业务的间隙按照加权公平排队(weight fair queue, WFQ)的方式参与调度,因为这三种业务排在 TDM 业务之后调度,所以都会受到 TDM 业务的阻塞。设链路数为 n ,则经过的调度节点数为 $n + 1$ 。此时这三种业务端到端的延时可以表示为^[7]

$$E(D) \leq \frac{\sigma}{r} + \sum_{i=1}^{n+1} E(C_i^s) \quad (1)$$

式(1)中 $E(D)$ 是端到端的延时, σ 是漏桶模型中网络边缘处漏桶的深度,相当于边缘节点输出端口缓存的大小, r 为不同等级业务预留的带宽值, $E(C_i^s)$ 为数据包在第 i 个节点的延时。当同时有 i 个业务流在网络中并存时,如果每个活动业务流的到达函数受 (σ, λ) 限制,则在 $[s, t]$ 时间间隔内到达的数据位数最大为 $(\sigma + \lambda(t - s))$ 。设排在 EF 数据包前面的 n 个 TDM 数据包总长度的数学期望为 $E(L)$, 根据定义, $E(L) = \sum l_i p_i$, 其中 l_i 是第 i 个 TDM 包的净荷长度,分布率 $p_i = \Pr\{L = l_i\}$ 。记系统中当前活动的业务流数为 m , 业务流 i 的权重为 w_i , 链路输出带宽为 C , 则服务该业务流的虚拟服务速率为

$$C_i = C \times \frac{w_i}{\sum_{j=1}^m w_j}, \text{相应地,队列延时的界限为}$$

$$0 \leq E(D) \leq \frac{E(L)}{C} + \frac{\sigma_i}{C_i} \quad (2)$$

在式(2)中, $E(L)$ 的值是基于统计分析得出的,时延 $E(D)$ 的上限与 $E(L)$ 之间近似为线性关系,而且 $E(L)$ 的增长会恶化 IP、Ethernet 等分组业务的时延性能。 $E(D)$ 的方差可表示为

$$\frac{\sum_{i=1}^n (E(D)_i - \overline{E(D)})^2}{n}, \text{所以时延的方差与 } E(L)$$

的平方成正比。对于网络中常见的 IP 语音(voice over IP, VoIP)、视频点播(video on demand, VoD)等业务而言,为确保实时传输质量,其延时和抖动必须限定在一定的范围内。因此,TDM 数据包的长度不能过长。而为了提高电路业务的传输效率,TDM 数据包的长度又不能太小。所以,在不改变业务速率的前提下,协议允许根据性能需求对该包长进行改变,通过测试找到合适的 TDM 净荷长度,既保证通信质量,又提高传输效率。

2 流量特性对分组业务的影响

T-MPLS 网络作为一种承载网络,需要考虑对多种流量特征的分组业务进行有效的传送。而近些年来在 Internet 上涌现出来的大量业务已不仅仅是传统话音业务所表现出的泊松到达特性,而是更多地呈现出自相似(self-similar)的特点^[8]。为了考察自相似特性,开关(ON/OFF)模型被广泛应用于网络中各种业务源的仿真中。其中,ON 和 OFF 分别指业务发送的持续时间和间隔时间,这两者连同数据包长分布,成为考察业务流量特征的重要指标。

2.1 业务发生规律的影响

就目前 T-MPLS 网络中存在的业务而言,以 VoIP 为代表的泊松业务的持续时间在统计上恒定,数据包长恒定,到达率服从负指数分布,仅具有短程的相关性。这说明从长期来看,泊松业务进入路由器队列时所引起的队列长度增长不会持续,也不会引起网络的大规模丢包。文献[9]说明近几年来在 Internet 上快速增长的 VoD 业务和点到点(peer to peer, P2P)业务的持续时间和数据包长往往服从对数正态分布或者威布尔(Weibull)分布。从数字特征上看,对数正态分布的数学期望和方差可以分别表示为 $e^{\mu + \sigma^2/2}$ 和 $(e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}$, 其中 μ 和 σ^2 分别为标准正态分布的均值和方差,所以对数正态分布相当于将标准正态分布的数字特征指数化。这反映到业务的持续时间和包长分布上,就导致业务流量经常在短时间内发生突变,总体具有较强的突发性。对服从威布尔分布的业务而言,位置参数 k 和形状参数 λ 决定了该分布的特征, k 较大时,Weibull 分布表现为狄拉克函数的形式,业务到达间隔在更大的时间尺度上表现出了不确定性。除此之外,Web 浏览, E-mail, FTP 等业务的持续时间和数据包长通常服从帕雷托(Pareto)分布,该分布的长尾效应使其较前几种分布类型更能体现出网络流量的自相似性。文献[10]指出了若把分组队列的长度 Q 看作一个随机变量,则 Q 的概率分布可以被公式 $\Phi(\sqrt{\Psi(t_x)}) \leq P(Q > x) \leq \exp(-\frac{1}{2}\Psi(t_x))$ 所限制,其中 $\Psi(t_x)$ 表示不同分布的业务到达间隔, $\Phi(x)$ 表示标准高斯分布的剩余分布函数,可表示为 $\Phi(x) = \exp(-\frac{1}{2}x^2)/\sqrt{2\pi(1+x)^2}$ 。所以,当业务到达间隔的方差较大时,队列长度就会维持在较

高水平。

2.2 业务自相似性的影响

自相似性的强弱主要由自相似系数 H 衡量, 又被称为 Hurst 参数。该参数所带来的 Hurst 效应和长程相关性, 重尾分布三个指标可以反映出自相似业务对 T-MPLS 网络性能的影响。文献[11]阐明了 Hurst 效应是指具有可求和的自相关平稳过程当 Hurst 参数大于 0.5 时, 样本中极端值的持续时间较长。这种极端持续时间也可以理解为网络通信量的突发性, 且这种突发性不会因为聚集而被平滑掉, Hurst 参数越大, 突发性也越强。这说明当 T-MPLS 网络中引入多个自相似业务后, 链路吞吐量的方差不但不会降低, 反而会有明显提高。

长程相关反映了自相似过程的持续现象, 表明自相似流在微小尺度上的突发也会因为长程的相关而引起业务普遍的突发。所以, T-MPLS 网络中的自相似业务会使系统的流量输入速率比均值高出很多, 当预留的带宽不足以满足经常性的突发流量时, 将导致数据吞吐时间的进一步增加, 缓存不足时就会出现丢包的现象。在上层协议的作用下, 数据的丢失又会导致重传, 产生新的通信量, 加重网络的负担。

同时理论还证明, 网络通信的自相似性会导致重尾分布, 具有重尾特征的分布函数衰减过程相对于指数分布要慢, 使稀有事件以大概率发生^[10]。这也说明了网络中自相似业务的突发现象并不是暂时的, 而是能够以较大的概率不断地重复发生。因此, 传统的队列管理方法并不适合自相似业务的拥塞控制。

3 仿真结果分析

为了验证电路业务包长和分组流量特性对网络性能的影响, 搭建基于 OPNET modeler 软件的平台进行仿真。有别于传统的单节点排队分析模型, 该模型中 T-MPLS 业务将通过 4 个节点所组成的排队网络, 即设计 0→7→11→15 作为一条业务的传输路径, 其中 0 和 15 节点为 T-MPLS 网络的边缘节点, 7、11 为核心节点。有 4 个不同种类的业务源与 0 节点相连, 分别发送 EF 业务、AF 业务、TDM 业务与以太网业务, OAM 业务在节点中产生, 每隔固定时间发送网络性能检测包。假设所有链路均有足够的带宽, 仿真拓扑如图 2 所示。

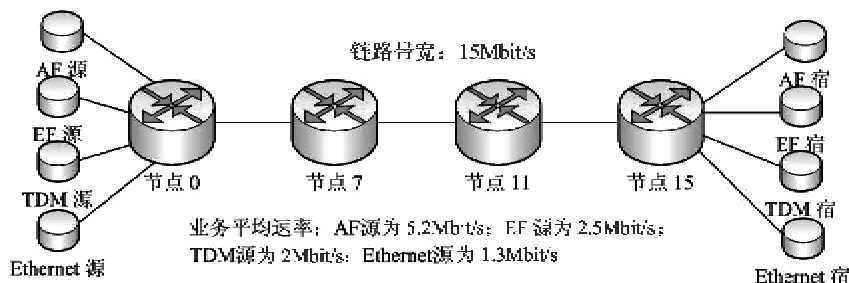


图 2 仿真拓扑结构

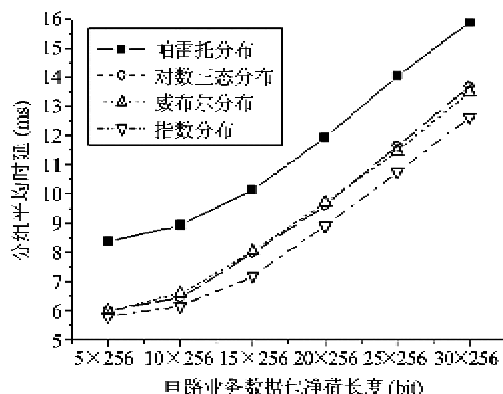
各个业务源的平均速率如图 2 所示, 设定 TDM 业务为恒定速率的 E1 连接。EF 业务按照第 1 节的分析, 持续时间和数据包长分别设为 4 种不同的分布类型, 且按照思科的建议标准不超过网络中业务总流量的 33%。AF 业务作为网络中已存在的具有自相似特性的背景流量参与转发, 突发性相对 EF 流较弱。以太网业务参考文献[2]进行设定, 为每包长度为 68 字节的泊松流。OAM 的业务量很小, 不作主要分析。基于以上参数进行仿真, 共设两个场景。第一个场景验证网络轻载时, 随着 TDM 包的净荷长度逐渐增加, EF 业务传输性能的变化; 第二个场景验证网络重载时, 不同分布特性的 EF 业务服务质量所受的影响。

3.1 时延与抖动性能分析

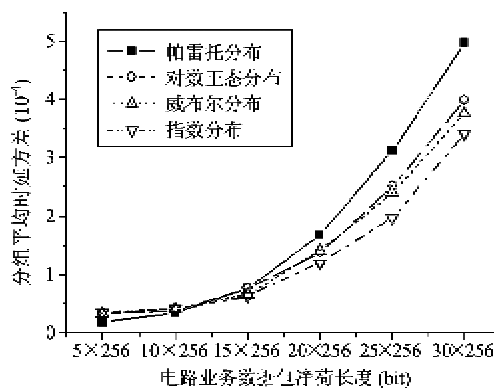
在网络中多业务并存的条件下, 观察不同分布特性的 EF 业务在 60s 的仿真时间内平均时延和方差的变化情况。设置 TDM 包 256bit 的净荷大小为一个 unit, 仿真的变化范围为 5~30 unit。由图 3(a) 与图 3(b) 可以看出, 随着 TDM 包长的不断增加, 在队列调度过程中 EF 业务被阻塞的情况不断加重, 表现为所有的 EF 业务平均时延随着 TDM 包长增加呈线性增长, 而方差呈平方增长, 这与理论分析的结论相同。但不同分布特性的业务之间也存在着很大区别, 对 Pareto 业务而言, 在 Hurst 效应的作用下, EF 与 AF 两股流的汇聚导致了业务总体的突发性加强, 所以延时和方差的增长也因此相比其他业务更

加迅速。而对数正态分布与 Weibull 业务的突发性虽然也很强,但由于其自相似性总体不如 Pareto 业务明显,所以业务流汇聚之后总体的突发性并不如 Pareto 业务。相比之下,服从对数正态分布到达的泊松业务在整个仿真过程中流量相对平稳,而且它与另一股泊松特性的以太网流汇聚之后进一步平滑

了总的链路流量,所以延时和方差相对其它三种业务较小。由图 3 也可以看出,当 TDM 包的净荷大于 10 unit 后分组业务平均时延曲线的斜率就会加大,而大于 15 unit 后方差的增长也比较迅速,所以在实际业务传送时应该考虑这个因素,TDM 净荷大小宜控制在 10~15 unit 范围内。



(a)



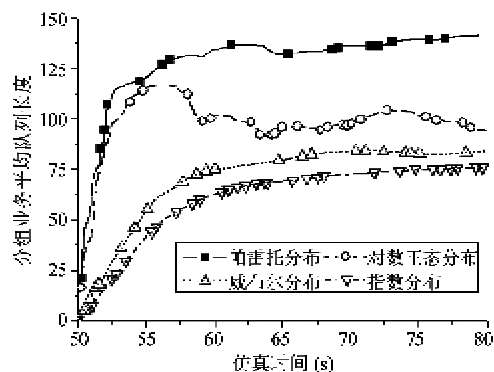
(b)

图 3 TDM 包长 vs. EF 业务平均时延(a)及 TDM 包长 vs. EF 业务时延方差(b)

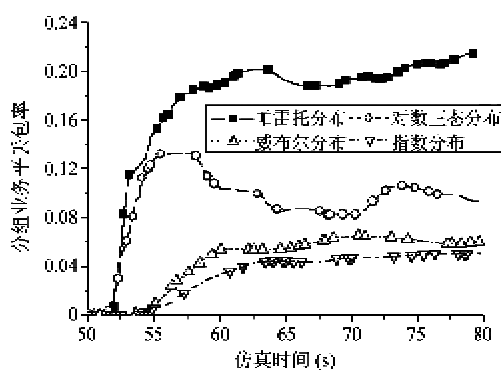
3.2 队列长度与丢包率分析

在不增加链路带宽资源的前提下加大一倍的业务量,设置 TDM 包的净荷长度为 30 unit 不变,采用 RED 算法进行队列拥塞控制,且不同分布类型的 EF 业务丢弃门限设置相同。观察当网络运行 50s 后开始引入的 EF 业务在边缘节点路由器中的队列长度和丢包率的变化情况,如图 4(a)和图 4(b)所示。可以看出,所有分布类型的 EF 业务流遭遇带宽瓶颈时,都会表现出队列长度的增长和丢包率的提高。可是结合上一节的理论分析可发现,就不同的分布

类型而言,因为 Pareto 业务的长程相关性和重尾特性,突发存在于各个时间尺度上,队列长度增长十分迅速,丢包率也有大幅攀升。由于对数正态分布业务数据包长和持续时间的方差较大,其队列长度出现了明显的波动现象,但总体而言没有很大攀升,丢包率的增长相比 Pareto 业务较为缓慢。仿真中 Weibull 业务队列长度和丢包率的增长情况与泊松业务类似,只是由于前者的突发性更强一些,所以队列长度和丢包率的数值更大。



(a)



(b)

图 4 仿真时间 vs. EF 业务平均队列长度(a)及仿真时间 vs. EF 业务丢包率(b)

综上所述,T-MPLS 网络中自相似业务的引入会对各种分组业务带来服务质量的影响。业务持续时

间和数据包长的突发性成了影响网络性能的不稳定因素,考虑到将来 T-MPLS 网络还可能承载更多类

型的上层业务,就必须适当增加边缘路由器的缓存,同时提高链路剩余带宽的预留比例,从而降低网络处于重载情况的可能性,减少高等级业务的丢包率。

4 结 论

本文基于 T-MPLS 网络多业务传送的特点,分析了在 LLQ 调度机制下电路业务封装包长和分组业务流量特性对网络中各种分布类型的业务的影响,并通过仿真予以验证。理论分析和仿真结果均说明,当采用 LLQ 调度机制进行多业务传送时,电路业务封装包长的增加虽然可以有效地提高该业务本身的传送效率,可是也会使低优先级的分组业务的传送质量迅速恶化。如果同时考虑分组业务不同的流量特性,那么这种恶化对强自相似性的业务影响会更大。T-MPLS 网络中的路由器也需要进行改进以适应所承载业务的自相似特征。下一步的研究考虑结合高斯随机过程理论,对 T-MPLS 网络排队模型中队列长度、丢包率等参量进行更加深入的数学解析。

参考文献

- [1] ITU-T Recommendation G.8110.1/Y.1370.1, Architecture of transport mpls (t-mpls) layer network, 2006: 8-15
- [2] Ronald A. Skoog. Managing the convergence of carrier ethernet with optical transport. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, San Diego, CA, 2009. 1-3
- [3] Rouskas G N, Baradwaj N. TDM emulation in packet-switched networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Glasgow, UK, 2007. 1911-1916
- [4] A. Malis, Tellabs, M. Townsley. IETF RFC 4623. <http://tools.ietf.org/html/rfc4623>. 2006.8
- [5] Gulliver S R, Ghinea G. The perceptual and attentive impact of delay and jitter in multimedia delivery. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2007, 53(2):449-458
- [6] Gulliver S R, Ghinea G. The perceptual influence of multimedia delay and jitter. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Beijing, China, 2007. 2214-2217
- [7] Fischer M J, et al. Approximating low latency queuing buffer latency. In: Proceedings of Fourth Advanced International Conference on Telecommunications, Athens, Greece, 2008. 188-194
- [8] 葛晓虎, 朱耀庭, 朱光喜. 基于 Alpha 稳定自相似过程的网络业务流建模. 高技术通讯, 2003, 13(11):11-16
- [9] Takacs A, Csaszar A, Biro J, et al. Path integrity aware traffic engineering. In: Proceedings of Global Telecommunications Conference(GLOBECOM), Dallas, USA, 2004. 692-696
- [10] Xiaolong Jin, Geyong Min, Lan Wang. A comprehensive analytical model for weighted fair queuing under multi-class self-similar traffic. In: Proceedings of International Communication Conference(ICC). Dresden, Germany, 2009. 1-5
- [11] Gubner J A. Theorems and fallacies in the theory of long-range-dependent processes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(3): 1234-1239

Study of transport characteristics of multi-level packet service for T-MPLS networks

Cao Chang, Zhang Yongjun, Chen Rui, Huang Shanguo, Zhang Jie, Gu Wanyi

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

Based on ITU-T' transport multi-protocol label switching (T-MPLS) standard, this paper studies the multi-level packet service transport characteristics of the T-MPLS networks which deal with the circuit service and the packet service simultaneously and obey the Pareto distribution, the Lognormal distribution, the Weibull distribution and the exponential distribution in service ON/OFF duration and packet length. The theoretical analysis shows that the cutting length of circuit service at edge routers and the distribution characteristics of the ON/OFF duration and packet length have different levels of effect on the high class packet service in latency and its variance, queue length and packet lost rate at the routers' egress. The conclusions of theoretical analysis were proved by the simulation using a test bed based on the OP-NET modeler.

Key words: transport multi-protocol label switching (T-MPLS), circuit service, packet service, self-similarity