

光传送网低时延 GMP 映射方案设计及实现

李正辉, 韩 震

(烽火通信科技股份有限公司, 武汉 430073)

摘要:低时延性能是未来 5G 通信网络的一项核心技术指标,对光传送网通用映射规程(GMP)映射进行时延优化能够有效降低网络总时延。简要分析了光传送网中时延构成,阐述了 GMP 映射的一般原理,并提出了一种基于状态机自适应控制的 GMP 映射方案,通过快速自适应调整,最大限度地降低缓存深度,从而降低处理时延。仿真和实测证明,该方案可将 GMP 映射时延控制在 50ns 左右,对 5G 通信系统低时延设计具有极大应用价值。

关键词:GMP; OTN; 低时延

中图分类号:TN915.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)04-0005-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.002

Design and implementation of low-latency GMP mapper scheme in optical transport network

LI Zhenghui, HAN Zhen

(Fiberhome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430073, China)

Abstract: Low-latency is one of the core technical indexes of 5G communication network, and the latency optimization of optical transport network GMP mapping can effectively reduce the network latency. Firstly, the time delay in optical transmission network is briefly analysed, and then the general principles of GMP mapping is described, at last, a kind of GMP mapping scheme based on self-adaptive control state machine is proposed, which can minimize buffer depth by fast adaptive adjustment, then reduces processing latency. The simulation and measurement prove that this scheme can control the GMP mapping time delay to around 50ns, which is of great value to the design of 5G communication system low-latency.

Key words: GMP; OTN; low-latency

0 引言

近年来,人们对移动通信需求的不断增长,推动着移动互联网技术的飞速发展。为了应对未来爆炸性的移动数据流量增长、海量的设备连接、不断涌现的各类新业务和应用场景,第五代移动通信(5G)系统的概念应运而生。未来 5G 网络不仅对数据接入速率有更高的要求,在一些特殊的应用场景(如遥控驾驶、工业机器人和远程医疗等),对时延更是提出了“无感知”的苛刻要求。5G 网络对端到端(E2E)提出了毫秒级的时延要求^[1]。E2E 时延是指数据包从源节点开始

传输到目的节点并被正确接收的时间,也即 E2E 时延包含了用户信息从接入、汇聚和传送的整个过程。信息从源节点到目的节点,经过不同的网络,会经历不同的封装和映射处理,不同的封装和映射协议或者同种封装映射协议和不同的封装映射实现方法带来的时延差别较大。为满足 5G 网络低时延的需求,本文提出一种具有超低时延特性的通用映射规程(GMP)映射方案。

1 通信网中的时延

1.1 E2E 时延的概念

E2E 时延就是信号从一个终端用户有效传送到另一个终端用户所需的时间。图 1 为通信网的结构示意图,通信网一般包含终端、接入层、汇聚层、核心层和

收稿日期:2017-12-15。

基金项目: 国家科技重大专项课题《5G 前传及回传接口研发与验证》(2017ZX03001016-005)资助。

作者简介:李正辉(1985-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为 OTN 光网络设备逻辑开发。

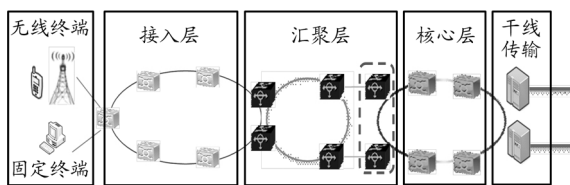


图 1 通信网的结构

干线传输等。每层网络都有各自的处理时延和传输时延,接入层/汇聚层/核心层的主要时延为信息处理时延,传输时延可忽略不计。而对于干线传输网,信息处理时延为次要因素,主要的时延为信息传输时延。信息传输时延取决于传输距离的长短,传输距离确定后,传输时延无法改变,而信息处理时延则可以通过优化设计降低。

1.2 光传送网(OTN)的时延与优化

OTN 设备主要负责将客户侧数据流封装映射成 OTN 帧结构,并通过前向纠错码(FEC)技术,将信息有效传送到远端。影响 OTN 时延的主要因素为:①传输距离。距离对时延的影响为 $5\mu\text{s}/\text{km}$,对于远距离($>1000\text{km}$)传输的场景,距离带来的时延会达到 OTN 总时延的 85%以上。②FEC 算法。FEC 编译码时延为 $1\sim 100\mu\text{s}$ 量级,不同的 FEC 算法带来的编译码时延也会不同,如采用级联的 FEC 编译码方案,虽然可以获得更高的编码增益,但其时延和普通 FEC 编译码相比将翻倍。③映射封装方式。映射封装带来的时延为 $1\sim 50\mu\text{s}$ 量级,OTN 协议涉及的映射方式包含 GMP、异步映射规程(AMP)、比特同步映射规程(BMP)和通用成帧规程(GFP)等,每种映射方式带来的时延各不相同,其中 GMP、AMP 和 BMP 映射是针对比特流的映射,因此时延相对较低,而 GFP 映射由于需要解析数据包,时延相对较大。④映射路径。映射路径的复杂程度也会带来时延的差异,如多级映射比一级映射的时延要大。⑤线路速率。线路速率不同,线路时延也会不同,这主要是由于不同线路速率下,业务处理时钟周期不同造成的,一般来讲,线路速率越高,线路时延越小。上述给出的时延量级的范围均考虑了不同线路速率带来的影响。

以上 5 种影响 OTN 时延的因素中,有些是无法优化的,比如距离带来的时延,受限于光波的传输速度,无法改变。而 FEC 算法的选取和线路速率的选取则取决于对用户通信服务质量(QoS)的保证。所以,排除传输时延和 FEC 部分时延后,对通信系统进行低时延优化设计时,映射和封装部分的时延优化是一个主要的方向。

从原理上讲,不同交叉容量和线路速率的 OTN 设备可应用在图 1 所示网络结构的相应网络子层中,而不仅仅是干线传输。例如未来 5G 系统,由于基站容量的显著提升,采用小型的简化 OTN 设备可以有效解决 5G 前传网络的大容量接入需求。所以对 OTN 网络映射封装处理时延的优化有可能使各网络子层的处理时延性能均得到提升,从而使系统总时延得到明显改善。

GMP 映射是 OTN 设备的一种主要映射封装协议,GMP 映射既可在 OTN 网络内部实现低速 OTN 业务流到高速 OTN 业务流的汇聚,也可以完成对 OTN 网络外部固定比特速率(CBR)客户信号的承载。实现 GMP 映射的方法有多种,不同方法带来的处理时延差异较大,即针对 GMP 映射的优化设计带来的延时性能收益是较大的。综上所述,对 OTN 网络 GMP 映射时延的优化设计具有典型意义。

2 GMP 映射的一般原理

GMP 映射是一种针对异步数据流的通用映射方案,在 OTN 设备中得到广泛使用^[2]。GMP 映射的基本思想是,将一个相对低速的客户侧信号封装到一个相对高速的承载侧信号中,并通过插入填充动态平衡两侧的业务速率差。对于任何给定的固定比特速率的客户侧信号,在一个承载帧周期或者承载复帧周期内,需要承载的客户侧 $n \times M$ 比特块的数量为^[2]:

$$C_n = \frac{f_{\text{client}}}{n \times M} \times T_{\text{server}} = \frac{f_{\text{client}}}{f_{\text{server}}} \times \frac{B_{\text{server}}}{n \times M} \quad (1)$$

其中, f_{client} 为客户侧数据比特速率, f_{server} 为承载侧数据比特速率, 承载侧的数据比特速率 $>$ 承载侧的净荷比特速率 $>$ 客户侧的数据比特速率, T_{server} 为承载侧帧周期或者复帧周期, B_{server} 为承载侧一个帧周期或者复帧周期的比特数, M 为映射颗粒度, C_n 为承载侧一个帧周期或者复帧周期要承载的客户侧 $n \times M$ 比特数据块的数量, n 的取值可以是 1/8、1 和 8 等。

通常 C_n 为非整数,所以实际 GMP 映射时,一个承载侧帧周期需要承载的 $n \times M$ 比特块的数量要么为 $C_n = \text{floor}(C_n)$, 要么为 $C_n = \text{ceiling}(C_n)$, 以达到两侧速率动态平衡。对应地,一个承载侧帧周期内需要插入填充块的数量要么为 $P_{\text{server}} - \text{floor}(C_n)$, 要么为 $P_{\text{server}} - \text{ceiling}(C_n)$ 。其中, floor 为向下取整, ceiling 为向上取整, 例如 $\text{floor}(3.2)=3$, $\text{ceiling}(3.2)=4$; P_{server} 为一个承载侧

帧周期内的净荷大小(以 $n \times M$ 比特块数量表示)。按照 $C_n = \text{floor}(C_n)$ 对客户数据进行映射,经过一个承载侧帧周期后还没有映射完的数据量用 C_{nd} 表示,多帧后累积没有映射完的比特块数据量用 ΣC_{nd} 表示,需注意 ΣC_{nd} 累积时向 C_n 的进位, C_{nd} 可直观地理解为 C_n 的小数部分。 ΣC_{nd} 的作用是方便解映射时恢复时钟。

将一个承载周期内的 P_{server} 个 $n \times M$ 比特块的编号标记为 j , 则 $1 \leq j \leq P_{\text{server}}$, 填充插入的位置由 Sigma-delta 算法决定^[2]:

①当 $(j \times C_n) \bmod P_{\text{server}} < C_n$, 编号为 j 的 $n \times M$ 比特块为客户数据;

②当 $(j \times C_n) \bmod P_{\text{server}} \geq C_n$, 编号为 j 的 $n \times M$ 比特块为填充。

GMP 映射的核心是通过动态控制插入填充块的数量和位置,完成客户侧数据流的异步封装和承载过程,插入填充的目的是为了实时动态平衡两侧数据流的速率偏差,以实现异步数据流的稳定转换。GMP 解映射时需要根据 Sigma-delta 算法将填充的位置找到并从数据流中剥离,恢复出客户侧原始数据,然后利用 ΣC_{nd} 恢复客户侧时钟。

3 低时延 GMP 映射方案及实现

3.1 普通 GMP 映射方案

由 GMP 映射的一般原理可知,对插入填充的控制以及如何确定 C_n 值和 ΣC_{nd} 值是 GMP 映射的核心部分。GMP 映射主要包含以下 3 个关键点。

①如何实时确定 C_n 值。即确定下一帧需要插入数据块和填充块的数量各是多少,合理的 C_n 值计算方法有利于有效调整两侧速率差距,避免缓存溢出,换言之,合适的 C_n 值算法有利于降低 GMP 映射处理的时延。

②如何实时确定 ΣC_{nd} 值。 ΣC_{nd} 和 C_n 、 C_{nd} 是相互关联的参数,一般找到其中任何一个值的计算方法后就可以推出其它两个值。

③如何确定填充插入的位置。按照既定规则插入填充,便于解映射时将填充剥离,填充插入的位置由 Sigma-delta 算法决定。

G.709 协议^[2]中只对上述第③点如何确定填充的位置有明确算法,而如何确定 C_n 值和 ΣC_{nd} 值并无明确规定。计算 C_n 和 ΣC_{nd} 的方法较多,一般地,计算 C_n 值的机制是利用 FIFO 缓存的水位或水位变化规律确定,一种典型的计算方法如下。

①将 FIFO 水位划分为多个水位区间,每个水位区间对应一个 C_{nd} 值,低水位对应较小的 C_{nd} ,高水位对应较大的 C_{nd} 。

②GMP 映射时从中间水位对应的中值 C_{nd} 开始进行映射, C_n 的初值设为 $\text{floor}(C_n)$ 。

③完成一帧映射后, ΣC_{nd} 自加 C_{nd} 累积一次,当 ΣC_{nd} 累积超过一个 $n \times M$ 比特块的大小时,进位产生新的 $C_n = \text{floor}(C_n) + 1$,如果 ΣC_{nd} 无累积进位,则 $C_n = \text{floor}(C_n)$ 维持不变, C_n 值确定了当前 GMP 映射实际承载速率。

④按照新的 C_n 值映射一帧后,判断 FIFO 水位是否有变化。如果此时 FIFO 水位上升了,则需根据上升后的水位选择对应较大的 C_{nd} 进行映射;如果水位下降了,则需根据下降后的水位选择对应较小的 C_{nd} 进行映射;如果水位不变,则维持当前的 C_{nd} 进行映射。

上述计算 C_n 和 ΣC_{nd} 实现 GMP 映射的方法有两个缺陷。一个是不同频偏的业务映射处理时延会不同,因为不同频偏的业务对应的 C_{nd} 不同,通过划分 FIFO 水位区间对应不同 C_{nd} 值的方案,会导致不同频偏的业务在映射稳定后, FIFO 水位锁定在该业务频偏的 C_{nd} 对应的水位附近波动,从而导致不同频偏业务的时延不同。另一个重要的缺陷是,设计需要保证所有满足频偏范围的业务都能正常映射,缓存无溢出,则必须考虑一个较大的 C_{nd} 值范围,因此需要为每个符合要求的 C_{nd} 划分 FIFO 水位区间,设置一个较大的 FIFO 缓存深度,但这会导致 GMP 映射时延显著增加。

3.2 低时延 GMP 映射方案

上述普通 GMP 映射方案时延较大且时延随业务频偏变化,本文提出一种基于状态机自适应控制的低时延 GMP 映射方案,可有效解决普通 GMP 映射的缺点。为了降低 FIFO 缓存深度,本文提出的低时延 GMP 映射方案将不同的 C_{nd} 划分为状态机的不同状态,以充分减小所需的缓存深度。

为便于表述,我们只考虑最简单的情况, GMP 映射状态机只设置两个边界状态,分别对应具有最大频偏的 C_{nd} 和最小频偏的 C_{nd} 。GMP 映射的实现过程为状态机在两个边界状态之间不停切换的过程,我们计算每个状态相应的 C_n 、 C_{nd} 和 ΣC_{nd} 值序列,结果如表 1 所示。最大频偏 C_{nd} 对应状态 1(上边界状态, C_{nd} 较大,每 X 帧有 X_0 帧以 $C_{nd} = \text{floor}(C_n)$ 映射,其它帧以 $C_{nd} = \text{ceiling}(C_n)$ 映射),最小频偏 C_{nd} 对应状态 2(下边界状态, C_{nd} 较小,每 Y 帧有 Y_0 帧以 $C_{nd} = \text{floor}(C_n)$ 映射,其它帧以 $C_{nd} = \text{ceiling}(C_n)$ 映射)。当业务频偏较大时,状态

表 1 GMP 映射状态机状态与 C_n 、 C_{nd} 和 ΣC_{nd} 序列的关系

状态	状态 1	状态 2
状态周期	X 帧	Y 帧
C_n 序列	$C_{n0} \cdots C_{n1} \cdots C_{n1} \cdots C_{n0} \cdots C_{n1}$	$C_{n0} \cdots C_{n0} \cdots C_{n1} \cdots C_{n0} \cdots C_{n1}$
C_{nd} 平均值	$(X-X_0) \times M/X$	$(Y-Y_0) \times M/Y$
C_{nd} 序列	$\cdots \text{floor}(\overline{C_{nd}}) \cdots \text{ceiling}(\overline{C_{nd}}) \cdots$	$\cdots \text{floor}(\overline{C_{nd}}) \cdots \text{ceiling}(\overline{C_{nd}}) \cdots$
ΣC_{nd} 序列	$\cdots \text{mod} \left(\sum_i C_{nd}(i), M \right) \cdots 0$	$\cdots \text{mod} \left(\sum_j C_{nd}(j), M \right) \cdots 0$

机的大部分时间将处在状态 1,反之,状态机大部分时间处在状态2。状态机的反复切换可得到一个统计平均的 C_{nd} 值。表 1 中每个状态每 1 帧的 C_{nd} 值 (C_{nd} 序列)都是对该状态下的平均 C_{nd} 向上或向下取整的结果,以得到统计平均的 C_{nd} 。 ΣC_{nd} 序列是对 C_{nd} 序列累加取模 M 的结果,当累加超过 M 个颗粒时, ΣC_{nd} 向 C_n 进位。在构造状态机状态时,需满足每个状态的最后一帧的 $\Sigma C_{nd}=0$,该方法的好处是避免两个状态间的两个相邻 GMP 映射帧之间的 ΣC_{nd} 累加运算,隔离状态之间 ΣC_{nd} 值的关联,减小设计复杂度。

考虑到 C_{nd} 精度问题,实际方案设计时,状态机的设计往往需要在两个边界状态之间插入更多的状态。合理设置状态机后,状态机的初态和状态切换条件是设计的关键所在,尤其是当状态增多后,状态机的初值选择至关重要。由于映射稳定后,不论实际业务频偏是多少,状态机必然只会在两个相邻的状态之间反复切换,这两个状态分别对应两个 C_{nd} ,一个比当前业务频偏的 C_{nd} 稍大,一个比当前业务频偏的 C_{nd} 稍小。如果状态机的初态选择不合适,例如状态机初态选择以最小 C_{nd} 对应的状态开始映射,而此时的业务又恰巧具有误差范围内允许的最大频偏,那么完成一次映射后,必然导致缓存水位上升较大。为了保证这种极端情况下缓存不溢出,需要设置一个较深的缓存,从而导致处理时延的增加。因此,找到一个最接近当前业务频偏的 C_{nd} 对应的状态作为映射状态机的初态可以充分减小映射处理时延。

确定状态机初态的方法如下:在正式执行 GMP 映射状态机之前,依次以 C_{nd} 从小到大对应的状态顺序执行映射状态机,每执行完一个状态后记录缓存水位相对中间水位的变化情况,然后复位并等待缓存到达中间水位方可执行下一个状态。显然,当以系统设置

的最小 C_{nd} 对应的状态执行状态机时,只要业务频偏在正常范围内,缓存水位相对中间水位必然会上升,所以按照上述顺序执行状态机,直到找到使缓存水位相对中间水位下降的那个状态,该状态即为 GMP 映射状态机的初态。以该初值状态执行 GMP 映射,稳定后,映射状态机必然在该初值状态和比该初值状态的 C_{nd} 稍小的相邻状态之间反复切换。状态切换的条件是每次当前状态映射结束,比较当前缓存水位相比中间水位是上升、下降或是不变,上升或是下降都会触发状态机向另一个状态切换,如果水位不变则维持本状态。按照上述方案设计映射状态机,选定状态机初值和状态转移条件执行 GMP 映射,不论状态机划分多少个状态,稳定后,映射状态机必然只在两个相邻的状态反复切换,最终实现稳定的低时延 GMP 映射。

3.3 低时延 GMP 映射方案的实现

本文基于XilinxVirtex UltraScalexcvu095 FPGA 平台,成功实现了 100GBASE-R 到 OPU4 的超低时延 GMP 映射,其实现框图如图 2 所示。设计时钟主频为 349.4M,处理位宽为 320bit,GMP 映射 FIFO 缓存深度为 32。表 2 为客户侧 100GBASE-R 信号和承载侧 OPU4 信号的相关 GMP 参数^[3]。表 3 为低时延 GMP 映

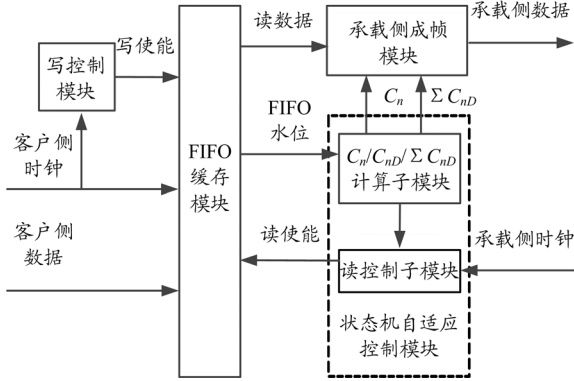


图 2 低时延 GMP 映射实现框图

表 2 100GBASE-R 到 OPU4 业务的 GMP 映射相关参数

GMP 参数	参数值	GMP 参数	参数值
n	8	客户侧最大频偏	$\pm 100\text{ppm}$
m	640	承载侧最大频偏	$\pm 20\text{ppm}$
M	80	B_{server}	8×15200
f_{client}	103125000kb/s	P_{mserver}	190
f_{server}	$238/227 \times$ 99532800kb/s	ΣC_{nd} 范围	0~79

表 3 100GBASE-R 到 OPU4 业务的 GMP 映射状态机与 C_n 、 C_{nd} 、 ΣC_{nd} 序列的关系

状态	状态周期	C_n 值序列	C_{nd} 平均值	C_{nd} 序列	ΣC_{nd} 序列
状态 1 每 8 帧有 1 帧以 $C_n=189$ 映射,其它以 $C_n=188$ 映射	8 帧	188 188 188 188 188 188 188 189	10.000	10 10 10 10 10 10 10 10	10 20 30 40 50 60 70 0
状态 2 每 7 帧有 1 帧以 $C_n=189$ 映射,其它以 $C_n=188$ 映射	7 帧	188 188 188 188 188 188 189	11.429	11 12 11 12 11 12 11	11 23 34 46 57 69 0
状态 3 每 19 帧有 3 帧以 $C_n=189$ 映射,其它以 $C_n=188$ 映射	19 帧	188 188 188 188 188 188 189 188 188 188 188 188 189 188 188 188 188 188 189	12.632	13 13 12 13 13 12 13 13 12 13 13 12 13 13 12 13 12 13 12	13 26 38 51 64 76 9 22 34 4 75 18 30 43 55 68 0
状态 4 每 6 帧有 1 帧以 $C_n=189$ 映射,其它以 $C_n=188$ 映射	6 帧	188 188 188 188 188 189	13.333	14 13 13 14 13 13	14 27 40 54 67 0
状态 5 每 11 帧有 2 帧以 $C_n=189$ 映射,其它以 $C_n=188$ 映射	11 帧	188 188 188 188 188 189 188 188 188 188 189	14.545	15 14 15 14 15 14 15 15 14 15 14	15 29 44 58 73 7 22 37 51 66 0

射状态机的状态划分,总共分为 5 个状态,状态机初态的确定和状态转移条件如 3.2 节所述。

我们采用 modelsim 进行仿真,仿真结果显示,无论业务频偏如何,只要在协议允许的范围内,GMP 映射状态机可将映射 FIFO 的缓存水位始终控制在中间水位附近波动,映射时延为 16~19 主频时钟周期。采用 ONT-600 光网络测试平台对该低时延 GMP 映射做了时延测试,测试结果显示经过本文设计的 GMP 映射模块后,业务处理时延增加了 53ns,大约为 18~19 个主频时钟周期,仪表测试结果与仿真结果基本一致。

4 结束语

考虑到未来 5G 通信系统低时延承载的需求,本文首先分析了通信网的时延构成,然后着重从信号映

射和封装的角度讨论了时延的优化,提出了一种基于状态机自适应控制的超低时延 GMP 映射方案。利用该方案实现了客户侧 100GBASE-R 信号到承载侧 OPU4 业务的 GMP 映射,仪表实测的映射时延为 50ns 左右,显著提升了系统的时延性能,这对通信系统的时延优化设计具有较大的实用价值。

参考文献:

[1] IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求白皮书[M/OL]. 北京: IMT-2020 (5G) 推进组, 2014 [2017-12-15]. http://www.cttl.cn/data/bps/201504/t20150402_2100341.htm
[2] ITU-T. Interface for the Optical Transport Network: G.709/Y.1331[S]. Geneva, Switzerland: ITU-T, 2016.
[3] 李允博. 光传送网(OTN)技术原理与测试[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.

敬告作者

为广泛构架起作者和读者之间的桥梁,本刊加入了 CNKI 中国期刊全文数据库等数据期刊网,即每期刊物出版后,我们将把同样的数据送至上述数据库或网站,使信息能以最快的速度国际化、网络化。其中稿费已包含于本刊一次性所付作者的稿费中。

为尊重作者的著作权,如果有作者不同意将出版后的文章进入上述数据库或网站,来稿时敬请注明,否则将视为同意,谢谢合作。

《光通信技术》编辑部