

# 灵活以太网标准中基于客户端流量的日历分配

云·廖、赛义德·阿里·哈希米、~~赫尚·埃尔巴库利、约翰·乔菲、安德里亚·戈德史密斯~~  
美国斯坦福大学电气工程系  
美国未来科技

yunliao@stanford.edu, ahashemi@stanford.edu, helbakoury@gmail.com, cioffi@stanford.edu, andrea@wsl.  
.stanford.edu

**摘要**——提出了一种适用于灵活以太网标准的自适应带宽分配机制。所提出的方法基于客户端的实际传输数据速率来设计 FlexE 日历。具体而言，所提出的方法将带宽利用率非常低的客户端视为次要客户端，并允许它们以机会主义方式进行传输。在真实以太网数据包跟踪上的实验表明，通过使用所提出的日历方案向客户端分配带宽，在满足丢包要求的同时，所需的 FlexE 总带宽可以减少高达 60%。

## I. 介绍

以太网标准不断发展，以改善局域网上的设备连接。与无线连接相比，基于以太网标准的有线局域网提供了更好的稳定性和可靠性、增强的安全性以及更容易扩展到更大的网络。为了使用以太网标准传递越来越多的信息，越来越需要新的高效接口来连接基于以太网的局域网 [1]。在以太网标准中提供自适应物理层 (PHY) 接口已经做了一些努力，这些接口可以根据模拟方案和数据速率灵活地改变参数 [2], [3]。但是，这些方法与具有多个固定速率以太网 PHY 模块的现有路由器不兼容。此外，应该在具有不同容量的不同链路之间进行切换，以充分利用网络容量。

灵活以太网 (FlexE) 最近被开发和标准化，以打破仅支持与现有 PHY 接口容量相匹配的媒体访问控制 (MAC) 速率的限制 [4]。FlexE 不仅高效地聚合不同的 PHY 模块以支持更高的 MAC 数据速率，还提供了一种机制，允许具有不同数据流的多个 MAC 客户端能够通过单个或多个 PHY 链路传输数据。FlexE 的主要优势在于它提供了灵活性，而不需要标准化新的 PHY 接口容量。因此，它已被用于许多应用，如光传输网络

[5] 和第五代蜂窝通信 (5G) 的网络切片 [6]。

为了分离媒体访问控制客户端数据速率和以太网 PHY 容量，FlexE 使用放置在媒体访问控制层和 PHY 层之间的垫片来协调和分发客户端数据流到 PHY 实例。垫片内部是 PHY

带宽被分成块，并且日历被用来指定 MAC 客户端到块的分配。与 FlexE 相关的主要问题有两个：首先，日历槽是根据承载它们的物理链路的带宽分配给客户端的。然而，这在实践中可能过于保守，因为大多数客户端不会以接近链路容量的速率传输。其次，处理数据速率远低于日历时隙速率的媒体访问控制客户端的机制效率不高。事实上，如果一个媒体访问控制客户端以非常低的速率传输数据，一种简单的方法是为该媒体访问控制客户端分配一个日历时隙，并使用虚拟数据来填充该时隙，这将导致显著的带宽损失。另一种方法是使用一个媒体访问控制帧缓冲器来收集低速率数据，并在缓冲器满时传输 [4]。然而，这种方法在通过网络的数据传输中引入了长延迟。

所提出的方法基于客户机的实际带宽利用信息来建立 FlexE 日历分配方案。这种灵活的分配降低了灵活链路的带宽要求，并适应了数据流的波动。具体而言，所提出的方法将具有非常低的数据速率或低带宽利用率的客户端视为次要客户端，并允许它们以机会主义方式传输，而不是获得指定的日历时隙。因此，FlexE 带宽利用率显著提高。对于具有高数据速率的主要客户端，基于其历史数据速率引入了两种带宽估计方法。在真实的以太网数据包跟踪上对所提出的方案进行了评估，结果表明所提出的灵活的日历分配方案有效地适应了客户端的波动

数据速率。特别是，与当前的 FlexE 标准相比，所提出的方案将总带宽需求降低了高达 60%。此外，当具有有限大小的缓冲器

用于当前 FlexE 标准无法提供所需丢包率的 FlexE 垫片，所提出的方案可以自动确定带宽需求的增加量，并将丢包率保持在小范围的值内。据作者所知，这是第一篇研究基于客户端动态数据速率的动态 FlexE 日历分配的论文。这项工作显示了 FlexE 的潜力，可以为比当前标准更多的客户提供服务。

本文其余部分的结构如下。第二节简要介绍了当前 FlexE 标准的背景。

第三节描述了所提出的弹性日历分配方案，并介绍了带宽估计方法。第四节介绍了实验和结果。论文在第五部分结束

## II. FLEX 以太网

FlexE 是光学互联网工作论坛 (OIF) 的一项实施协议，它提供了一种机制来支持不一定对应于可用性的媒体访问控制客户端速率

能干的 PHY 评价[4]。这种机制允许通过三种不同的方案进行灵活的数据速率分配：

- **绑定:**通过绑定多个 PHY 实例，允许媒体访问控制客户端以高于可用 PHY 速率的速率传输数据。例如，两个 PHY 实例可以支持每秒 100 千兆位的数据速率 (100 克) 可以绑定以支持带有数据速率 200G。
- **信道化:**允许多个媒体访问控制客户端传输通过单个或多个保税 PHY 实例的数据。例如，两个媒体访问控制客户端各有一个 50G 的数据速率可以通过单个 PHY 实例传输数据，该实例可以支持 100G 的数据速率。
- **分级:**允许媒体访问控制客户端具有较低的数据速率比单个或多个绑定 PHY 实例通过它们传输数据的数据速率更高。例如，数据速率为 75G 的 MAC 客户端可以传输数据通过可以支持数据速率的 PHY 实例 100 克。

FlexE 标准中也预见到了上述三种方案的组合。

图 1 举例说明了 FlexE 的体系结构，包括绑定、信道化和分级。FlexE 架构中有三个主要组件:MAC 客户端、FlexE 垫片和 FlexE 组。媒体访问控制客户端将数据聚合成 64 位的块，并将其编码成 66 位 (64b/66b 块)。这些 64b/66b 块然后以 10G 的数据速率作为比特流被传输到 FlexE 填补，40G，或者 25G 的整数倍。上的挠性垫片发送端负责将从媒体访问控制客户端接收的 64b/66b 块分配到 FlexE 中

团体。在接收端，FlexE 填补程序负责将 FlexE 组中的 64b/66b 块分配给预期的 MAC 客户端。因此，在发送端称为 FlexE 多路复用器，接收端称为 FlexE 多路分解器。FlexE 组由多个以太网 PHY 实例组成，每个 PHY 实例为

能够支持 100 克、200 克或 400 克的数据流。应该注意的是，200 克和 400 克物理电极分别由两个和四个键合的 100 克物理电极构成。

FlexE 多路复用器根据日历将从媒体访问控制客户端接收的 64b/66b 块分配给 64b/66b 块的逻辑串行流。对于 FlexE 组中的每个 100G PHY 实例，分配一个子日历，该子日历有 20 个时隙，每个时隙的带宽为 5G。因此，对于具有 M 100G PHY 实例的 FlexE 组，

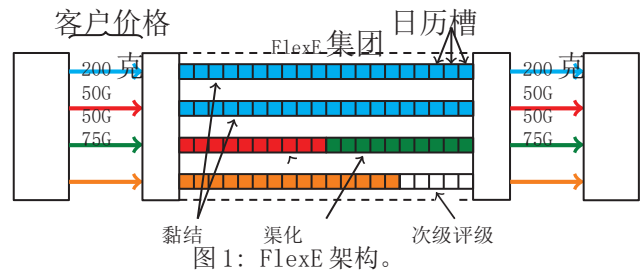


图 1: FlexE 架构。

日历的长度为 20M。子日历按顺序分配给弹性组中的 PHY 实例。

为了在 FlexE demux 上同步数据接收，每发送 1023 次日历，就在日历的所有子日历中插入一个开销块。这对应于每  $1023 \times 20$  有一个开销块给定 PHY 实例的数据块。

## III. 基于客户数据率的 FLEXE 日历分配

在当前的标准中，FlexE 垫片根据承载客户端数据的物理链路的 PHY 速率为每个客户端分配日历槽。尽管它很简单，但这种方案导致了僵化的日历结构，不能有效地适应数据流的波动。此外，当多个低速率客户端与高速率客户端共存时，低速率客户端的流量在几个日历中被缓冲和传输一次。这需要足够大的缓冲区来存储从低速率客户端接收的数据包，从而导致长时间的延迟。本节介绍了一种灵活的弹性日历分配方案，该方案提高了弹性日历的利用率，并减少了低速率客户端的延迟。

### A. 日历分配方案

为了提高高速 FlexE 链路的效率，新方法评估 FlexE 客户端的传输数据速率，并使用阈值相应地将客户端标记为主要客户端或次要客户端。如果客户端的实际传输数据速率低于分配的阈值，则被标记为“次要”，否则被标记为“主要”。为了区分小客户和大客户，门槛大大低于 PHY 能力。

在提议的方案中，FlexE shim 根据对主要客户端所需带宽的估计，仅将 calendar 时隙分配给它们。次要客户端没有指定的日历槽。相反，他们以机会主义的方式传播。换句话说，当主要客户端没有完全使用它们的指定日历槽时，或者当给主要客户端的指定日历槽的总数小于可用日历槽的数量时，次要客户端传输数据。当有足够的日历时段可供次要客户端使用时，它们会以先到先得的方式进行传输。所提出的方法没有考虑异质延迟要求

为了简单起见，在客户端或数据包之间。然而，通过将具有更严格延迟要求的客户端视为主要客户端，或者将它们视为次要客户端并在次要客户端传输其数据的队列中对它们进行优先排序，所提出的方法可以容易地适应这种延迟要求。

提议的日历分配方案遵循当前的 FlexE 标准，即每个日历包含 20 个分配给客户端的时段。然而，这种分配放松了限制在 100 克整数倍的 PHY 带宽限制。相反，新方法估计传输所有客户端数据的总带宽，并使用该估计值作为评估提议的日历分配方案性能的指标。事实上，考虑到链路具有类似于 FlexE 情况的固定带宽，这种带宽需求可以直接转换为可以在高速链路上传输数据的客户端数量。此外，对提议的日历分配方案的调整每 T 秒定期进行。

弹性垫片将接受 N 个主要客户并进行评估在持续时间为 T 的时间段 s 内，第 I 个主要客户端所需的带宽，表示为  $b_{u I}(s)$ 。此外，每个日历槽的固定带宽将是 r 分配给第一个主要地区的日历时段

因此，周期 s 可以被计算为至少  $\frac{b(s)}{r}$ ，其中 | 表示天花板功能。为了确保分配给主要客户端的日历槽总数不超过 20 个，对于每个时间段 s，r 需要满足

$$\sum_{I=1}^N \frac{b(s)}{r} \leq 20. (1)$$

此外，对于每个时间段，该策略可以回顾客户的更长历史

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=N} b_i(s)}{r} \leq \frac{\sum_{i=1}^{i=N} b_i(s)}{r} + \frac{N(2)}{r}$$

其中使用了  $x \leq x + 1$  的事实。

让  $B = \sup_{s \in \mathcal{S}} \sum_{I=1}^N b_i(s)$ 。然后，最小带宽符合每个日历 rmin 的要求

$$\frac{B}{20} \leq \frac{B}{\text{北纬} 20 \text{度}}. (3)$$

因此，为所有主要客户端传输数据所需的总带宽在以下范围内

$$B \leq 20r \leq \frac{20B}{\text{北纬} 20 \text{度}}. (4)$$

用上述区间中的一个二分搜索法来求总数所需带宽 20rmin。

每个主要客户端在垫片中至少有一个日历槽，一个日历中总共有 20 个位置。结果是 (4) 中的推导隐含地假设主要客户端的数量 N 不大于 20。

## B. 主要客户端所需的带宽估计

本小节提供了几种方法来估计每个主要客户端所需的带宽。每个主要客户端在进入 FlexE 垫片之前都通过自己的以太网链路传输数据。因此，在进入 FlexE 垫片之前，可以分别估计每个客户端所需的带宽。当前的 FlexE 标准直接使用客户端的 PHY 链路带宽，以保证每个主要客户端在任何时间段都有足够的带宽。这种策略虽然简单，但效率非常低，因为通常主要客户并不总是充分利用链路带宽。根据这一观察，建议的日历分配取决于每个客户的测量数据速率，并允许根据主要客户的数据流模式动态调整日历分配

变化。

1) 基于上次峰值数据速率的带宽估计: 第一个建议的策略使用每个客户端在时间段 s 内的峰值数据速率来估计该客户端的需求

s + 1 时间段内的带宽。第 s 个时间段内客户端 I 的峰值数据速率为 Ri。该策略使用以下表达式来估计  $b_{u I}(s+1)$ :

$$b_{u I}(s+1) = f(R_i(s)), (5)$$

其中 f() 可以是任何函数。其中一个选择很简单

线性函数  $f(x) = \alpha x$ ，参数  $\alpha \geq 1$  进行估计  $b_{u I}(s+1)$ 。该策略允许日历槽的变化 - 持续时间 T 的每个时间段的分配。此后策略具有低复杂性，可以在应用程序中使用其中需要实时带宽估计。

2) 基于模型驱动的数据速率预测的带宽估计: 不是使用前一个周期的峰值数据速率来估计所需的带宽，而是一种变体

数据速率预测未来期间的数据速率

然后使用预测来确定所需的带宽。可以采用几种时间序列分析方法来预测主要客户的数据率。本作品采用了

自回归综合移动平均 (ARIMA) 模型 [7]

对于预测任务，这是已知的最一般的预测离散时间序列的一类模型。

ARIMA(p, d, q) 模型有三个参数，其中滞后顺序 p 显示包含的滞后观测值的数量

在该模型中，差分度 d 是原始观测值被差分的次数和顺序

q 指定移动平均窗口的大小。

定义 1 (ARIMA(p, d, q) 模型): 考虑  $\{X_t | t \in \mathbb{Z}\}$

作为离散时间序列，L 作为时滞算子

$L(X_t) = X_{t-1}$ 。ARIMA 模型是一个嘈杂的 X

形式的离散时间线性方程

$$\sum_{k=1}^p \alpha_k X_{t-k} + \sum_{k=1}^q \beta_k \epsilon_t = X_t, (6)$$

其中  $\alpha_k$  和  $\beta_k$  是模型系数， $\epsilon_t$  表示时间戳 t 处的白噪声。



根据上面的 ARIMA(p, d, q) 模型, 时间戳为 t 时的一步预测如下

$$\hat{x}_t = \sum_{k=1}^p \phi_k (1-L)^d X_t \theta_k + \sum_{k=1}^q \sigma_k e_t \quad (7)$$

其中,  $\phi_k$  和  $\theta_k$  是可以从数据拟合的系数,  $e_t = X_t - \hat{x}_t$  是时间戳 t 处的预测误差。请注意, 通过将预测误差项相加, 可以得到模型自动将时间戳为 t 的所有历史数据合并到预测中。

ARIMA 模型提供了在某个时间戳 T 的数据速率的预测。然而, 在相对长的时间段 T 期间需要带宽的预测。因此, 在单个时间戳的预测可能不会导致期望的性能。为了进一步提高估计的准确性, 从时间段 s, 即

两个样本之间的时间间隔为 T/W, 其中  $W > 1$  是一个整数。然后, ARIMA 模型预测

下一个 W 时间步进并在 W 个预测中选择最高的预测数据速率作为估计的峰值数据速率

与前面的策略类似, 选择一个缩放参数  $\alpha$ ,  $\alpha$  的作用

第 I 个主要客户端所需的带宽。

注意, 由于预测算法具有低复杂度, 它们可以使用与 PHY 层算法相同的处理器, 并且不需要片外控制器。

### C. 缓冲器

提议的日历分配方案允许聚合总链路容量超过灵活链路带宽的灵活客户端。基于绝大多数以太网链路没有在其容量附近运行的观察, 所提出的自适应日历分配方案可以减少所需的 FlexE 带宽。但是, 带宽节省可能会导致偶尔的短期带宽超额预订, 即客户端的瞬时带宽变得大于分配的带宽。为了解决这个问题, 使用了一个缓冲池来吸收聚合输入数据流中的瞬时峰值, 并避免数据丢失。因为缓冲池已经被预见为 FlexE 标准的一部分

为此目的, 建议的方案没有提出这种需要作为额外的缓冲。

缓冲池大小对于设计建议的日历分配方案至关重要。大的缓冲池可以有效地抑制入口中的瞬时尖峰, 从而允许进一步降低带宽需求。相比之下

小缓冲池很容易被偶尔的入口填满)\*

尖峰, 因此需要很大的带宽来避免缓冲池溢出导致的潜在数据包丢失。缓冲池大小为

其特征用数据填充缓冲池所花费的时间。例如, 100 兆字节的 1 毫秒缓冲池对应于 100 兆字节 × 1 毫秒 = 100 兆字节的缓冲池大小。

<sup>1</sup> 拟合 ARIMA 模型的复杂度为  $O(N)$ , 其中 N 是训练序列的长度, 预测的复杂度为  $O(1)$ 。

表一: 数据包跟踪统计

找到: 查出身份证明	捕获日期	开始时间	数量小包裹	平均汇率 (兆位/秒)	标准开发运算速度 (Mbps)
一	2018/05/09	04:29	55.30 米	529.35	188.99
2	2018/05/09	04:44	50.11 米	499.15	162.95
3	2018/05/09	05:44	50.30 米	504.63	180.59
四	2019/04/09	04:14	69.40 米	852.77	321.55
5	2019/04/09	05 点	89.80 米	1118.01	512.06
6	2019/04/10	14 点	271.97 米	2796.28	552.85
七	2019/04/17	14 点	260.89	2555.38	390.31

## IV. 实验和结果

本节描述了实验设置, 并根据 FlexE 垫片所需的带宽和客户端经历的丢包率分析了建议的 FlexE 日历时隙分配方案的性能。

### A. 资料组

由于没有 FlexE 流量的公共数据集, 因此这里的结果使用了来自 WIDE MAWI 档案 [8] 的 15 分钟长的数据包跟踪。这些跟踪是使用商品服务器从 10G 链接捕获的。使用模拟弹性链接

多个客户端, 2018 年和 2019 年捕获的 10 个数据包跟踪被对齐, 并被视为 10 个不同的客户端。所选 10 条轨迹的详细信息如表一所示

这里的结果仅使用表 1 中提供的开始时间和数据包数量。

由于数据包跟踪是在 10G 链路上根据当前 FlexE 标准, 需要携带 100 兆 FlexE 链路

这 10 个客户。

### B. 实验设置

对于建议的两种灵活的弹性日历分配方案, 弹性垫片每秒改变一次日历分配, 即  $T = 1$ 。对于 ARIMA 的利率预测模型中, 预测间隔 t 设置为 0.1s。此设置

然后允许 ARIMA 模型提前预测 T/t = 10 个时间步长, 并使用这 10 个预测来确定指定给每个主要客户端的带宽。

对于 ARIMA 模型的利率预测, 由于不同的模型 ARIMA(p, d, q) 给出了明显不同

预测时, 结果会对参数进行网格搜索 (p, d, q) 对于每个主要客户, 在任意选择的 20 秒周期内测试预测的可靠性, 并选择最佳集合。参数的搜索范围是  $p \in \{0, 1, 2, 4, 6, 8\}$ ,  $d \in \{0, 1, 2\}$ ,  $q \in \{0, 1, 2\}$ 。可靠性的衡量标准是

$$\sigma_E = \frac{1 + 4.5}{\text{SGN}(X_t)} - \frac{X_t}{T} \quad (8)$$

这是加权均方误差, 对低估的影响大于高估。

所有方案下的丢包率测试都是在任意选择的 20 秒周期内进行的。测试周期与的优化周期不重叠

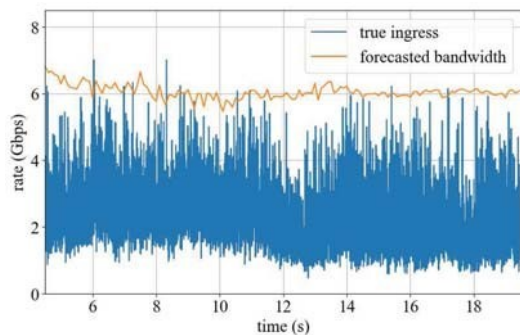


图 2: ARIMA 模型预测的所需带宽。

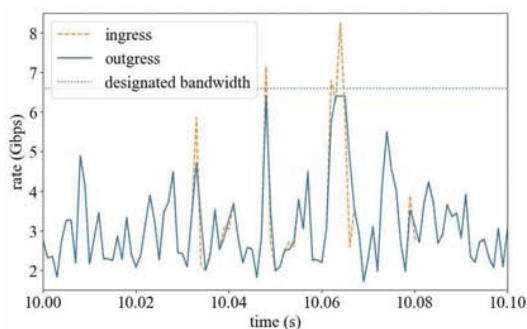


图 3: 一个主要客户端的入口和出口的详细说明。

ARIMA 模型。选定的测试周期包含 3310 万个入口数据包。

### C. 结果和分析

图 2 显示了 ARIMA(8, 1, 1) 模型给出的第二大客户的数据率预测。可以看出，实际输入数据速率有时可能会超过预测带宽为短期峰值，但不会长时间高于预测值。这表明 ARIMA 模型给出的预测可以被视为对输入数据流速率的安全估计。

图 3 显示了一个主要客户端（对应于跟踪标识 1 的客户端）的详细输入和输出数据速率。本实验使用日历分配方案 ARIMA 预测模型，缓冲区大小为 1 毫秒。在图中的时间窗口期间，客户端获得三个指定的日历时段，对应于 6.6G 带宽。该图显示，即时入口数据速率有时超过了分配的带宽，但在缓冲区中短暂延迟后，数据仍可成功传输。为了使图清晰，显示了进气和排气速率每 1 毫秒。因此，保持在指定带宽下的入口曲线不一定意味着

即时进入速率也保持在带宽之下。这解释了为什么即使在它们都保持在指定的带宽下。这个数字

显示了在 FlexE 填补程序中使用适当的数据包缓冲区可能会抑制分配给客户端的带宽

这一水平甚至小于它们的峰值数据速率，而没有任何分组丢失。

图 4 示出了基于最后峰值数据速率的日历时隙分配方案。左侧 y 轴显示分配给每个客户端的日历插槽数量，右侧 y 轴显示相应的带宽。图 4b 和 4c 中所示的带宽通过比例因子  $\alpha$  的变化来调谐，以确保测试集中的零分组丢失。图 4b 和 4c 中的灵活方案显示了不规则的日历分配方案。这些方案有时会留下几个未分配的日历时隙，这些时隙可用于传输次要客户端的数据包。此外，通过适当的缓冲区大小，灵活的日历分配方案所需的资源也大大减少

承载所有客户端的总带宽。例如，如果 FlexE 垫片配备了 1 毫秒的缓冲器，与标准相比，所需的带宽可以减少一半以上

方案如图 4a 所示。此外，图 4b 和图 4c 的比较不仅示出了图 4c 中更大的总所需带宽，而且还示出了日历时隙分配随时间的更多波动。这种变化是意料之中的，因为较小的缓冲区吸收带宽超额预订或传入流量峰值的能力较低。需要更大带宽的 FlexE 链路来保证数据顺利通过，日历需要更仔细地适应数据流的波动，这样客户端才能高效利用带宽。

图 5 评估了所提出的自适应日历分配方案在不同缓冲时间下的分组丢弃率。实线代表基于期间测量的客户端最后峰值数据速率的日历分配方案

前一个  $T = 1$  s 周期和虚线曲线是 ARIMA 给出的日历分配方案的结果

模型预测。可以观察到，对于任何给定的缓冲时间和相同的总带宽，与基于最后峰值数据速率的方案相比，由 ARIMA 预测模型给出的方案实现了更低的分组丢弃率。等效地，为了实现相同水平的分组丢弃率，ARIMA 模型给出的方案需要更少的带宽。这一结果表明，ARIMA 预测模型给出的方案优于基于最近峰值数据的方案

费率。此外，对于 1ms 缓冲器或 0.1ms 缓冲器的情况，在 10<sup>-6</sup> 的期望丢包率下，两种建议方案所需的带宽都明显小于当前 FlexE 标准中规定的 100G。

图 6 比较了来自另一方面的所需带宽，该另一方面评估了达到零所需的带宽

测试集中的数据包丢弃率。对于 1 毫秒缓冲区和 0.1 毫秒缓冲区，传统方案可以成功传输

没有任何丢弃的分组，但是当缓冲时间减少到 0.05 毫秒时，传统方案开始经历高分组丢失。这表明，对于常规方案

为了顺利工作，FlexE 垫片必须配有足够大的缓冲器。在所有评估的方案中，基于 ARIMA 模型的方案在总所需带宽方面更好。然而，使用 ARIMA 模型进行预测会导致不可忽略的计算开销，

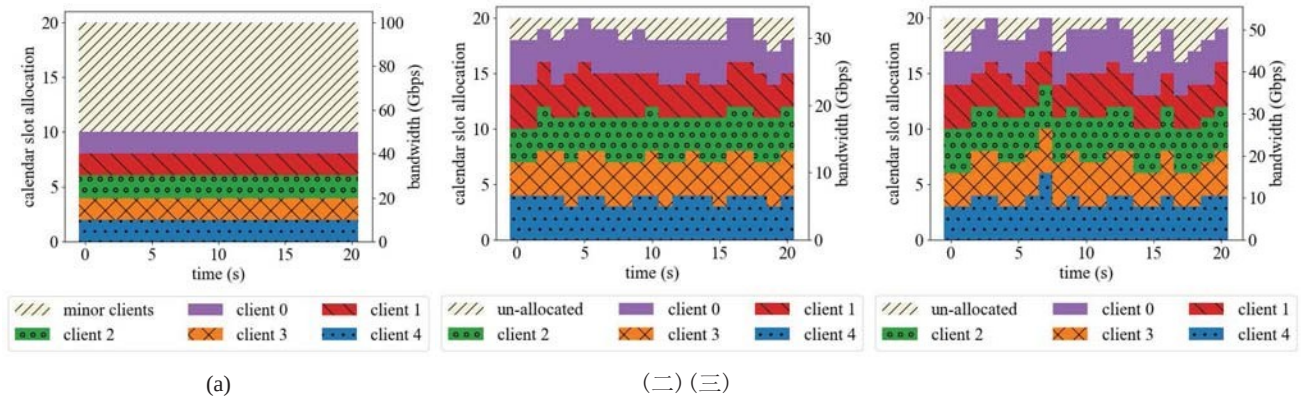


图4:日历分配方案:(a)按照现行FlexE标准进行日历分配;(b)灵活的日历分配,基于具有1毫秒缓冲区的最后峰值数据速率;(c)灵活的日历分配,基于0.1毫秒缓冲区的最后峰值数据速率。

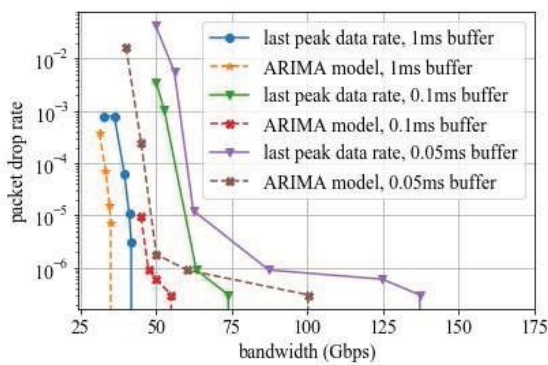


图5:不同日历分配方案下的丢包率与带宽的关系。

因为模型需要针对每个预测点进行重新调整。考虑到这一点,当缓冲区大小不太有限时,直接使用前一个时间段的峰值数据速率可能是一个不错的选择。这节省了所需带宽少量增加的计算开销。

## V. 结论

提出了两种FlexE垫片的自适应日历分配方案,即基于最后峰值数据速率的方案和模型驱动的数据速率预测方案。这些是FlexE标准中当前刚性方案的替代方案。在真实的以太网数据包跟踪上进行了实验,以评估它们在所需带宽和数据包丢弃率方面的性能。结果表明,与当前标准相比,所提出的方案可以显著降低高达60%的所需带宽,同时满足丢包要求。此外,所提出的方案也可以容易地扩展到分组缓冲器对于当前FlexE日历方案来说太有限而无法工作的情况。将异构网络拓扑和延迟要求纳入日历分配方案,以及使用新兴的机器学习算法来增强数据流预测和提高丢包率是未来研究的主题。

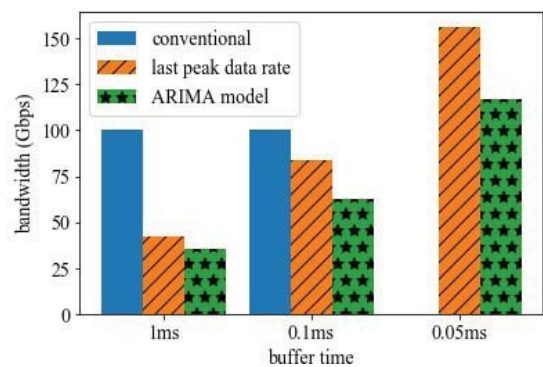


图6:在测试集中实现零丢包率所需的带宽。

承认

这项研究得到了华为的支持。此外,哈希米的工作得到了加拿大(NSERC)自然科学和工程研究委员会博士后的支持。

参考

- [1] 米 (meter 的缩写) Filer, j. 高德特, M. Ghobadi, R. Mahajan, T. Issenhuth, B. Klinkers 和 J. Cox, “微软云中的弹性光网络”, IEEE/OSA 光通信和网络杂志, 第8卷, 第7期, 第A45-A54页, 2016年7月。
- [2] B. 克卢埃、佩德罗、科斯塔、库什内罗夫、沙克斯、斯洛伐克、D. Rafique 和 A. Napoli, “下一代弹性光接口的网络方面”, IEEE/OSA 光通信和网络杂志, 第8卷, 第7期, 第A116-A125页, 2016年7月。
- [3] T. Hofmeister, V. Vusirikala 和 B. Koley, “如何在客户端最好地利用线路端的灵活性?” 在2016年3月的光纤通信会议和展览中, 第1-3页。
- [4] 光互联论坛, “灵活以太网 2.0 实施协议”, 2018年6月。[在线]。可用: <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-FLEXE-2.0-L.pdf>
- [5] A. Eira, A. Pereira, J. Pires 和 J. Pedro, “论光传输网络中灵活以太网客户端架构的效率”, 《IEEE/OSA 光通信与网络杂志》, 第10卷, 第1期, 第A133-A143页, 2018年1月。
- [6] K. Katsalis, L. Gatzikis 和 K. Samdanis, “走向传输网络切片: 5G 中灵活以太网的案例”, IEEE 通信和网络标准会议, 2018年10月, 第1-7页。
- [7] R. 《预测: 原理与实践》。奥特克斯, 2018年。
- [8] K. 宽项目中的交通数据储存库, USENIX 2000 年自由国际赛道, 2000年6月。