

AHashFlow 实验方案

赵宗义

2019 年 11 月 13 日

目录

1	基本定义	2
1.1	HashFlow	2
1.2	DHashFlow (HashFlow with Digest)	2
1.3	CHashFlow (HashFlow with Control Plane)	3
1.4	AHashFlow (Augmented HashFlow)	3
2	测量指标	3
2.1	包覆盖率 (PCR, Packet Covering Rate)	3
2.2	数据包的不测量率 (NMR, No Measurement Rate)	3
2.3	流覆盖率 (FSC, Flow Set Covering)	4
2.4	流数目估计相对误差 (RE, Relative Error)	4
2.5	数据流大小估计的平均相对误差 (ARE, Average Relative Error)	4
2.6	被测数据流大小估计的平均相对误差 (ARE, Average Relative Error)	4
2.7	heavy hitter 检测的 F1 Score	4
2.8	heavy hitter 检测的平均相对误差 (ARE, Average Relative Error)	5
2.9	控制平面的包负荷比 (PLR, Packet Load Rate)	5
2.10	控制平面的流负荷比 (PLR, Flow Load Rate)	5
2.11	数据流的 x -分布系数 (x Distribution Coefficient)	6

3	实验设计	6
3.1	Exp84491 ✓	6
3.2	Exp84492 ✓	6
3.3	Exp84493 ✓	7
3.4	Exp84494 ✓	7
3.5	Exp84495	8
3.6	Exp84496	8
3.7	Exp84497	9
3.8	Exp84498	9
3.9	Exp84499	10
3.10	Exp84500	11
3.11	Exp84501	12
3.12	Exp84502	12
3.13	Exp84503	13
A	AHashFlow 方案介绍	14

1 基本定义

1.1 HashFlow

原始的 HashFlow 方案，在数据平面记录完整的流标识符，没有控制平面，并且没有不活跃大流的退出机制。

1.2 DHashFlow (HashFlow with Digest)

在数据平面记录流标识符的摘要而不是完整的流标识符，同时增加控制平面来记录完整的流标识符，但是并没有引入不活跃大流的退出机制。在 DHashFlow 中，控制平面的作用仅仅是维护摘要和流标识符之间的映射关系，但是当有数据流从 A 表中升级到 M 表中而导致 M 表中的流数据项被替换的时候，我们并不会将被替换的流数据项导出至控制层。

1.3 CHashFlow (HashFlow with Control Plane)

CHashFlow 基本上和 DHashFlow 类似，即包含了摘要映射机制以及和摘要映射机制相匹配的控制平面，但是 CHashFlow 比 DHashFlow 更进一步，因为在 CHashFlow 中当 M 表中的数据流因为 A 表中的数据流升级而被替换的时候我们并不会把它直接丢弃，而是会将它导出至控制平面。

1.4 AHashFlow (Augmented HashFlow)

这是我们最终版的改良方案，在数据平面记录流标识符的摘要而不是完整的流标识符，使用控制平面来维护流标识符和摘要之间的对应关系同时记录从控制平面导出的流记录项，此外还增加了不活跃大流的退出机制。

2 测量指标

假设我们重放的数据包序列中包含 m 个数据包和 n 个数据流，则相关的测量指标可以定义如下：

2.1 包覆盖率 (PCR, Packet Covering Rate)

假设我们的测量算法的 M 表记录的数据包的总数是 m' ，在 CHashFlow 和 AHashFlow 中则包括从 M 表导出到控制平面的数据包的数目，则测量算法的包覆盖率可定义如下：

$$PCR = \frac{m'}{m}$$

2.2 数据包的不测量率 (NMR, No Measurement Rate)

假设 m_1 是没有被我们的测量算法测量到数据包的数目，具体而言就是在辅助表中发生冲突的时候被丢弃的辅助表表项的计数值的总和，则数据包的不测量率可定义如下：

$$NMR = \frac{m_1}{m}$$

严格来说，HashFlow 中 M 表中替换出去的包也不会被记录，因而属于不测量数据包的范畴，但是为了和包覆盖率相区别，我们在这里只计算没有机会被 M 表和 A 表记录的数据包，因为被 M 表和 A 表记录的数据包实际上是有可能通过控制层来记录的。

2.3 流覆盖率 (FSC, Flow Set Covering)

假设网络测量算法记录了完整的流标识符的数目为 n_1 ，则流覆盖率可定义如下：

$$FSC = \frac{n_1}{n}$$

2.4 流数目估计相对误差 (RE, Relative Error)

假设网络测量算法估计的网络中数据流的数目为 n_2 ，则流数目估计相对误差可定义如下：

$$RE = \frac{|n - n_2|}{n}$$

由于本文所考察的网络测量算法可以通过数据结构的使用情况估计没有明确记录的数据流的数目，因此算法所估计的数据流数目和算法所明确记录的数据流的数目并不完全相等。

2.5 数据流大小估计的平均相对误差 (ARE, Average Relative Error)

对于原数据包序列中的任意一个数据流 f_i ，假设它的真实大小为 m'_i ，而网络测量算法所返回的该数据流的大小为 m_i ，该数据流没有被测量算法明确记录则默认为 $m'_i = 0$ ，则数据流大小估计的平均相对误差可定义如下：

$$ARE = \frac{1}{n} \sum \frac{|m_i - m'_i|}{m_i}$$

2.6 被测数据流大小估计的平均相对误差 (ARE, Average Relative Error)

假设我们的测量算法记录的流分别为 f_1, f_2, \dots, f_k ，且对于任意一个数据流 f_i ($1 \leq i \leq k$)，它的实际大小为 m_i ，而我们的算法测得其大小为 m'_i ，则被测数据流大小估计的平均相对误差可定义为：

$$ARE = \frac{1}{k} \sum \frac{|m_i - m'_i|}{m_i}$$

2.7 heavy hitter 检测的 F1 Score

已经定义 heavy hitter 的阈值 γ ，假设原数据包序列中 heavy hitter 的数目为 c_1 ，网络测量算法所返回的 heavy hitter 的数目为 c_2 ，网络测量算法

所返回的 heavy hitter 中真实的 heavy hitter 的数目为 c ，则 heavy hitter 检测的召回率为 $RR = \frac{c}{c_1}$ ，准确率为 $PR = \frac{c}{c_2}$ ，因此 heavy hitter 检测的 F1 Score 可定义如下：

$$F1\ Score = \frac{2 \cdot PR \cdot RR}{PR + RR}$$

2.8 heavy hitter 检测的平均相对误差 (ARE, Average Relative Error)

如上，假设原数据包序列中共有 n' 个 heavy hitter，其中 heavy hitter f_i 的大小为 m_i ，而网络测量算法报告的 f_i 的大小为 m'_i ，如果 f_i 不包含在网络测量算法报告的 heavy hitter 中（包括 f_i 已经被网络测量算法记录但是没有被识别成为 heavy hitter 的情况），则默认 $m'_i = 0$ ，则 heavy hitter 检测的平均相对误差可定义如下：

$$ARE = \frac{1}{n'} \sum \frac{|m_i - m'_i|}{m_i}$$

2.9 控制平面的包负荷比 (PLR, Packet Load Rate)

在 AHashFlow 和 DHashFlow 中，我们需要将特定的信息（包括数据流的完整的流标识符以及主表中流记录）以数据包的形式从数据平面发送到控制平面以维护流标识符和指纹之间的映射关系，因此控制平面的包负荷比可定义如下：

$$PLR = \frac{m_1}{m}$$

其中 m_1 是控制平面处理的数据包的数目。

2.10 控制平面的流负荷比 (FLR, Flow Load Rate)

假设在 AHashFlow（或 DHashFlow）的运行过程中，控制平面一共收到了 m_1 个数据包，而交换机处理的数据包中一共包含了 n 个数据流，则控制平面的流负荷比可以定义如下：

$$FLR = \frac{m_1}{n}$$

2.11 数据流的 x -分布系数 (x Distribution Coefficient)

设 $0 < x < 100$ ，对于某一个数据流，它的第一个数据包在 trace 文件中的序号为 a ，它的最后一个数据包在 trace 文件中的序号为 c ，数据流的 $x\%$ 处的数据包在 trace 文件中的序号为 b ，则数据流的 x -分布系数可定义为：

$$xdc = \frac{b - a}{c - a}$$

3 实验设计

3.1 Exp84491 ✓

- Use the simulator of HashFlow implemented in python.
- Set the memory size to be 1 MB, so it can accommodate around 55K flow records.
- Select 10 trace files from each of the four traces.
- Initiate 50K flows from each trace file.
- Increase the depth of HashFlow from 1 to 4.
- Count the packets processed by the simulator, i.e., the number of original packets plus the resubmitted packets.

3.2 Exp84492 ✓

- Select a file from the CAIDA trace (equinix-nyc.dirA.20180315-125910.UTC.anon.pcap), extract the first 2.5 million packets, classify the TCP/UDP packets into flows, and then calculate the average size as well as the maximum size of the flows.
- Select a file from the HGC trace (20080415000.pcap), extract the first 2.5 million packets, classify the TCP/UDP packets into flows, and then calculate the average size as well as the maximum size of the flows.
- Calculate the average as well as maximum size of a file from China Telecom trace (nfcapd.201601022000).

- Calculate the average as well as maximum size of a file from Tsinghua campus trace (20140206-6).

3.3 Exp84493 ✓

- Set the memory size to be 1MB.
- Increase the number of flows from 10K to 100K, in the step size of 10K.
- Use a trace file from CAIDA and HGC respectively.
- Use four versions of HashFlow. In the versions the number of buckets in the ancillary table is $0.25\times$, $0.5\times$, $1.0\times$, and $2\times$ respectively of the number of buckets in main table.
- Calculate the average relative error for flow size estimation.

3.4 Exp84494 ✓

- 从中国电信、HGC、清华校园网和 CAIDA 的网络流量数据中分别随机选取一个网络流量文件。
- 从每个流量文件中分别提取 500 个数据包；对于清华校园网和中国电信，因为它们以流的形式记录网络流量，所以我们提取 n 个流，使得前 n 个流中的数据包总数不小于 500 万个，而前 $n - 1$ 个流中的数据包总数则小于 500 万。
- 记录每一个流量记录文件的 500 万个数据包中的数据流的数目。这里我们认为所有具有相同源 IP 地址，目的 IP 地址，源端口号，目的端口号和协议类型的数据包都属于同一个流。
- 将每个流的流标识符（即源 IP 地址，目的 IP 地址，源端口号，目的端口号和协议类型）都使用相同的哈希函数映射到一个 32 位的摘要，记录每个流量记录文件的前 500 万个包中流标识符对应的不同的摘要的数目。

3.5 Exp84495

本实验的实验参数设置如下：

- 实验方案为 HashFlow, DHashFlow 和 CHashFlow
- 将内存容量设为 1MB
- 使用一个 CAIDA 的 trace 文件
- 进行 10 组实验，将重放的数据包的数目以 20 万的步长从 50 万增加到 250 万
- 将 heavy hitter 的阈值设为一个固定值 10，即包含 10 个及 10 个以上数据包的流为一个 heavy hitter
- 测量的指标包括 heavy hitters 测量的 F1 Score 和平均相对误差，数据包的不测量率以及包覆盖率。

在此实验中可以预见的效果是，由于 DHashFlow 的 M 表比 HashFlow 的 M 表有更多的表项，因此 DHashFlow 的这四项性能指标都会明显优于 HashFlow。同时，由于 CHashFlow 的控制层能够存储从数据层的 M 表中替换出来的流记录项，因此 CHashFlow 的 heavy hitter 检测的 F1 Score 和平均相对误差以及包覆盖率都会优于 DHashFlow。此外，随着数据包数目的增加，各个算法的性能都会逐渐降低，但是 HashFlow 和 DHashFlow 的性能下降趋势相当，而 CHashFlow 的性能下降趋势要平缓得多。

3.6 Exp84496

本实验的实验参数设置如下：

- 实验方案为 AHashFlow 和 CHashFlow
- 将内存容量设为 1MB
- 从 CAIDA 和 HGC 的 trace 中分别选取一个文件
- 进行 10 组实验，将重放的数据包的数目以 50 万的步长从 50 万增加到 500 万
- 测量的指标包括流覆盖率，数据流大小估计的平均相对误差，被测数据流大小估计的平均相对误差，以及控制平面的流负荷比

在此实验中，我们预期的实验结果是 AHashFlow 的这四项指标都保持相对稳定的状态，其中被测数据流大小估计的相对误差要明显小于数据流大小估计的平均相对误差，而控制平面的流负荷比接近 2.0 甚至小于 2.0；AHashFlow 的各项性能指标应该都要优于 CHashFlow，尤其是 CHashFlow 的控制平面流负荷比应该会高于 AHashFlow 的控制平面流负荷比，说明在 CHashFlow 中不活跃大浪占据了宝贵的内存空间，导致其它的流更频繁地被替换。

3.7 Exp84497

本实验的实验参数设置如下：

- 实验方案为 AHashFlow 和 CHashFlow
- 将内存容量设为 1MB
- 从 CAIDA 和 HGC 的 trace 中分别选取一个文件
- 仅进行 1 组实验，将重放的数据包的数目设为 500 万
- 将 heavy hitter 的阈值以 5 的步长从 5 增加到 50
- 测量的指标包括 heavy hitter 检测的平均相对误差以及 F1 Score

在此实验中我们的预期实验结果是随着阈值的增加，heavy hitter 检测的 F1 Score 和平均相对误差都有明显的改善，说明 AHashFlow 确实有得大流的测量，同时 AHashFlow 的性能总是优于 CHashFlow。

3.8 Exp84498

在 CAIDA 和 HGC 的 trace 中分别选择一个文件并对前 500 万个数据包按数据流进行归类，之后遍历整个文件，统计在前 500 万个数据包中出现的流中没有被正常结束（即收到一个结束标志或者重置标志）的 TCP 流的数目。

如表1所示，在 CAIDA 的两个流量描述文件中，正常结束的 TCP 流数目占流总数的 34% 左右，而在 HGC 的两个流量描述文件中，正常结束的 TCP 流的数目仅占流总数的 21% 左右，因此在网络中仅仅根据 TCP 流的结束标志和重置标志来决定是否将数据流导出是不够的。我们需要设计更有效的机制来定时导出数据流。

表 1: 四个 trace 文件中的流构成情况

流文件	UDP 流数目	非正常结束 TCP 流数目	正常结束 TCP 流数目
CAIDA1	106261	105657	111317
CAIDA2	108571	105444	113325
HGC1	360298	102973	123863
HGC2	357986	102517	122892

此外，对于正常结束的流，我们将计算它们的 x 分布系数，其中 x 的值从 80% 增加到 95%，并绘制这些流的 x 分布系数的 CDF 图。

如图1所示，我们绘制了当 x 分别为 85%, 90%, 95% 和 95% 的时候四个流量描述文件中正常的数据流（即同时包含 SYN 标志以及 FIN 或 RST 标志的数据流）的 x 分布系数的 CDF 图。由于当数据流的长度为 2 时，对于任意 $x(50\% \leq x < 100\%)$ ，数据流的 x 分布系数为 0，因此为了减少误差，在计算 x 分布系数的 CDF 图的时候，我们故意排除了长度为 2 的正常数据流。由图中可以看出，对于 CAIDA 的流量描述文件中的数据流，超过 50% 的数据流在其生命周期的前 52% 便传输完成了 80% 的数据包，而有超过 35% 的数据流在其生命周期的前 52% 便传输完成了 95% 的数据包。同样，对于 HGC 的流量描述文件，有大约 42% 的数据流在其生命周期的前 54% 就传输完成了 80% 的数据包，而有 30% 的数据流在其生命周期的前 54% 就传输完成了 95% 的数据包。因此，在适当的时候结束提前结束并导出数据流将有利于提高数据平面的内存资源的利用率。

3.9 Exp84499

本实验的实验参数设置如下：

- 实验方案为 CHashFlow
- 将内存容量设为 1MB
- 从 CAIDA 和 HGC 的流量记录文件中分别选取两个文件
- 仅进行 1 组实验，将重放的数据包的数目设为 500 万
- 对 M 表中存放的数据流进行统计，择出其中处于不活跃状态的数据流（即已经传输结束的数据流），并为它们的最后一个数据包在流量记录

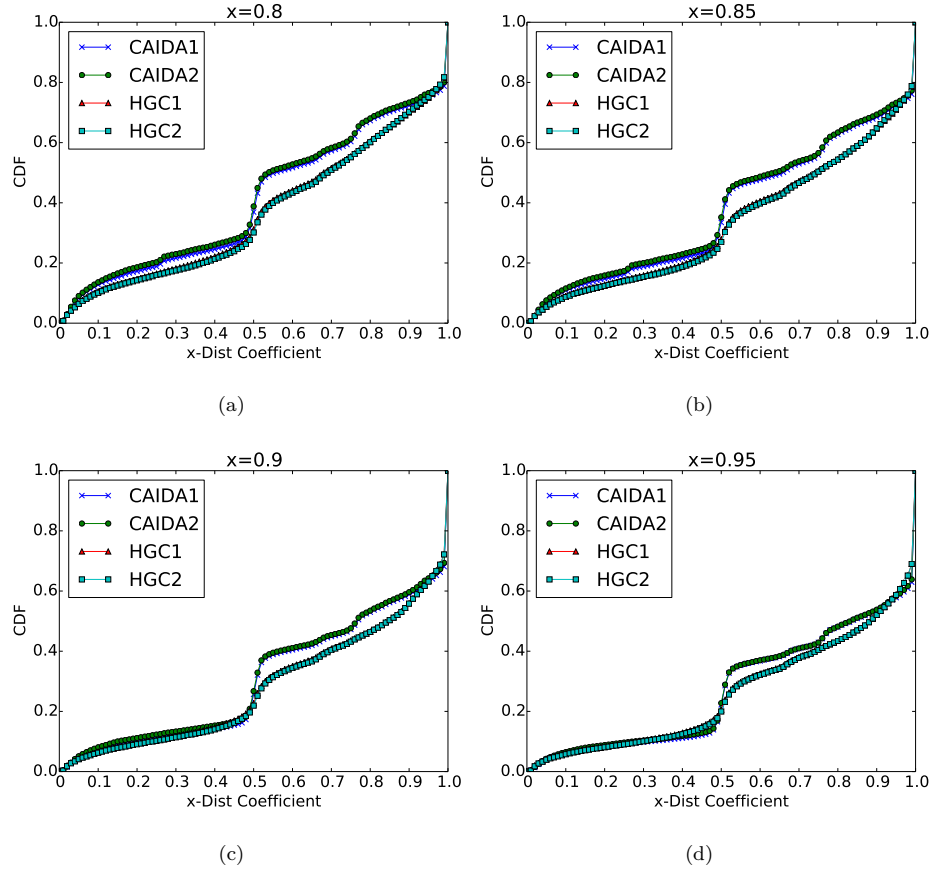


图 1: 当 x 分别取 0.8, 0.85, 0.9, 0.95 时四个 trace 文件的 x 分布系数变化情况。

文件中的序号绘制 CDF 图。

通过这个实验, 我们希望证明在 CHashFlow 中, 我们有大量的不活跃的流占用了宝贵的内存空间, 甚至有一些流长期地占用了 M 表的内存空间。

3.10 Exp84500

分别分析 CAIDA 的两个流量文件和 HGC 的两个流量文件, 对每个流量文件中前 500 万个数据包按照数据流进行归类。然后计算在收到某个数据流的 n 个数据包的前提下, 后续还将收到至少一个数据包的概率, 其中

n 的值从 1 增加到 20。

3.11 Exp84501

本实验的实验参数设置如下：

- 实验方案为 AHashFlow、CHashFlow 和 TurboFlow
- 将内存容量设为 0.25MB
- 选取一个 CAIDA 的网络流量文件
- 以 50 万的步长将重放的数据包从 50 万增加到 2000 万
- 将重流的阈值设置为 5
- 将 AHashFlow 的大流导出机制的启动参数设置为 5
- 测量的指标包括 heavy hitter 检测的平均相对误差以及 F1 Score

由图2可知，当网络中的数据包数量增加时，各个网络测量算法的重流检测的平均相对误差和 F1 Score 方面的性能都有明显的下降，但是 CHashFlow 的性能下降要更加明显，而且随着数据包的增加，AHashFlow 的性能趋于稳定，而 CHashFlow 的性能却一直保持下降的趋势。TurboFlow 在平均相对误差和 F1 Score 方面的性能的变化趋势和 AHashFlow 类似，但是要明显低于 AHashFlow 的性能，比如，当我们重放 500 万个数据包的时候，AHashFlow 的平均相对误差要比 TurboFlow 抵 44%，它的 F1 Score 要比 TurboFlow 高 8%。而 AHashFlow 的包负荷率一直明显小于 TurboFlow，大约为它的 10% 左右。

3.12 Exp84502

对于一个网络流量文件，对其前 500 万个数据包按流进行分类，同时记录每个流的第一个和最后一个数据包，并计算每个流的第一个和最后一个数据包在网络流量文件中的位置之差，比如某个流的第一个数据包在网络流量文件中的位置为 a ，最后一个数据包在文件中的位置为 b ，则它们的差为 $b - a + 1$ ，我们将这个差称之为这个流在网络流量文件中的跨度。分别选取 CAIDA 和 HGC 的两个网络流量文件，并绘制每个网络文件中各个流的跨度的 CDF 图。由图3可知，对于我们考察的四个网络流量文件，大约

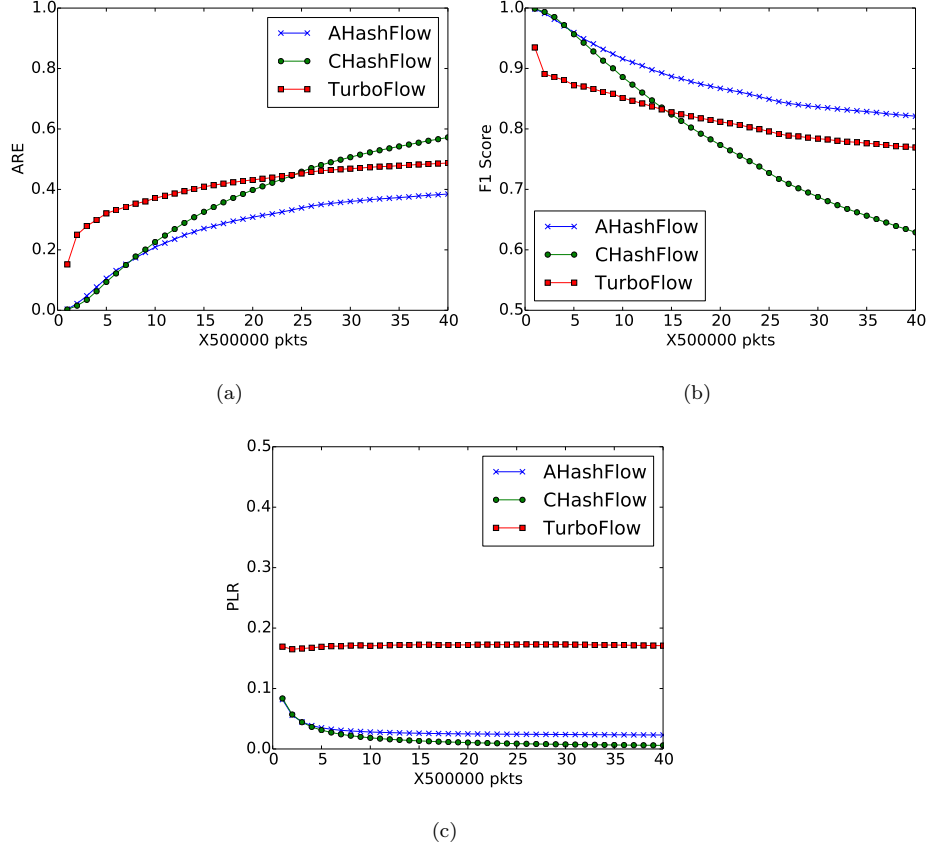


图 2: 我们在 CAIDA 中取一个网络流量文件, 并将重放的数据包从 50 万增加到 2000 万, 同时将重流的阈值设定成为 15; 随着重放数据包的数量增加, 我们计算 AHashFlow、CHashFlow 和 TurboFlow 在重流检测方面的平均相对误差和 F1 Score, 以及控制层面的包负荷比。

有 20% 的数据流的跨度超过 100 万个数据包, 即它们的第一个数据包和最后一个数据包在网络流量文件中的位置相差在 100 万个数据包以上, 说明有很多流在网络流量文件所记录的时期内会反复出现。

3.13 Exp84503

本实验的实验参数设置如下:

- 实验方案为 AHashFlow、CHashFlow 和 TurboFlow

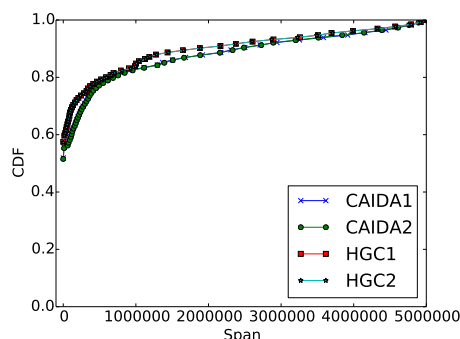


图 3: 四个不同的网络流量文件中数据流的跨度的 CDF 图

- 将内存容量设为 0.25MB
- 选取一个 CAIDA 的网络流量文件
- 重放的数据包数量为 500 万个包
- 将重流的阈值以 5 的步长从 5 增加到 50
- 将 AHashFlow 的大流导出机制的启动参数设置为 5
- 测量的指标包括 heavy hitter 检测的平均相对误差以及 F1 Score 和控制平面的包负荷率

如图4所示，当重流的阈值增加的时候各个算法的性能都有明显的提升，但是 TurboFlow 的性能的提升速度要远逊于 AHashFlow 和 CHashFlow。

附录

A AHashFlow 方案介绍

AHashFlow 的数据结构如图5所示，AHashFlow 的数据结构包括三个表，分别是 M 表、A 表和 B 表，其中 M 表中的第一个表项包括一个 4 字节的 digest 域和一个 4 字节的 count 域，A 表中每个表项包括一个 1 字节的 digest 域和一个 1 字节的 count 域，B 表中每个表项包含一个 4 个节的 count 域。

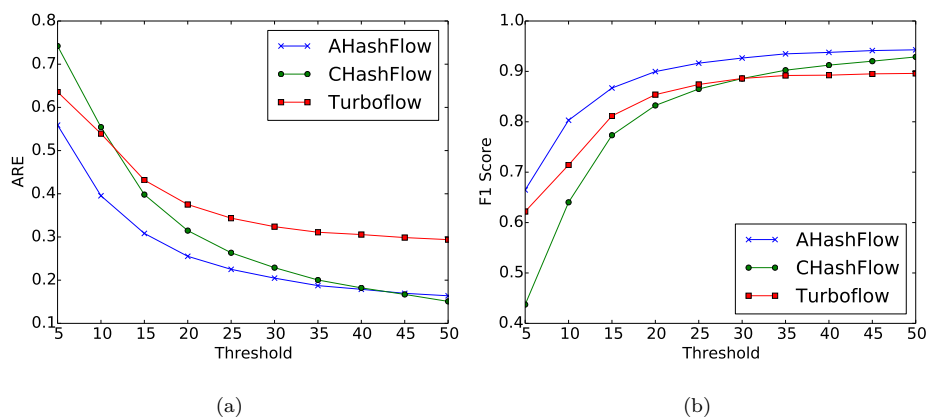


图 4: 我们在 CAIDA 中取一个网络流量文件, 并重放的 500 万个数据包, 同时将重流的阈值以 5 为步长从 5 增加到 50; 随着重放数据包的数量的增加, 我们计算 AHashFlow、CHashFlow 和 TurboFlow 在重流检测方面的平均相对误差和 F1 Score。

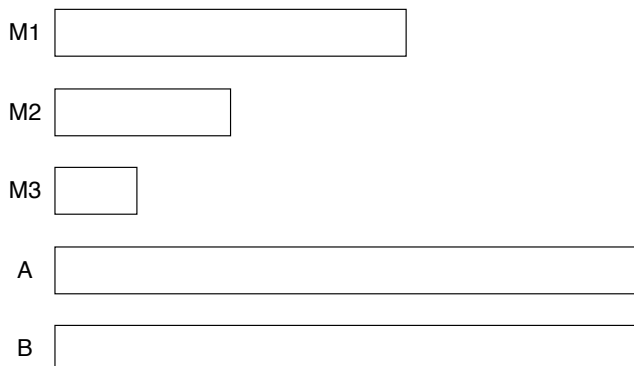


图 5: AHashFlow 的数据结构: 包括一个 M 表, 一个 A 表以及一个 B 表, 其中 M 表可分成若干小表

建议的内存分配方案是使得 M 表、A 表和 B 表有相同数目的表项; M 表可以分成若干个小表, 其中后一个小表的表项数目是前一个小表的表项数目的一半。

AHashFlow 对数据包的处理流程如算法2所示, 当一个数据包到达时, 提取它的流标识符 (默认为它的五元组 (源 IP 地址, 目的 IP 地址, 源端口号, 目的端口号, 协议类型)), 并将流标识符映射成为一个 32 位的 $digest_1$

Algorithm 1 *promote*($idx, digest, cnt$)

- 1: $export(\mathbf{A}[idx].digest, \mathbf{A}[idx].cnt)$
 - 2: $\mathbf{A}[idx] \leftarrow [digest, cnt]$
-

和一个 8 位的 $digest_2$ 。

之后，我们根据这个数据包的流标识符依次将这个数据包映射到 M 表的 d 个位置。在这 d 个位置上，如果我们找到了一个空表项，那么我们就将 $digest_1$ 写入该表项中并将其计数值置为 1，同时将数据包的流标识符导出到控制层，之后结束对数据包的处理。如果我们在 M 表中找到了一个 $digest$ 域为 $digest_1$ 的表项，那么我们只需要简单地将这个表项的计数值增加 1 便可以完成对这个数据包的处理。

反之，如果我们在这 d 个位置都不能找到一个空表项或者一个 $digest$ 域的值为 $digest_1$ 的表项，那么我们就记录这 d 个表项中的最大计数值 max 和最小计数值 min ，以及与之相对应的索引 idx_{max} 和 idx_{min} 。随后，我们进一步查询 A 表和 B 表。我们首先使用另一个哈希函数 g 将数据包的流标识符映射到一个索引值 idx 。由于 A 表和 B 表具有相同数目的表项，所以我们建议在 A 表和 B 表中均使用索引值 idx 。首先如果 A 表中对应的表项为空，则我们将该表项的内容设为 $[digest_2, 1]$ ，于是便可以结束对数据包的处理。但是如果该表项不为空且它的 $digest$ 和 $digest_2$ 相同，那么我们就在 A 表中找到了一个匹配的表项，因此我们首先把这个表项的计数值加 1 并记录在一个临时变量 $temp$ 中。如果 $temp > min$ ，则说明 A 表中缓存的数据流比 min 对应的数据流更大，因此按照优先记录大流的原则，我们使用 *promote* 函数将这个流提回 M 表中。因为我们在 M 表中并不记录数据流的完整流标识符，因此我们需要将这个数据包的流标识符导出到控制层。最后我们再将 A 表中的这个表项置为空。如果 $temp \leq min$ ，则需要将 $temp$ 写回到该表项的计数值中，实际上是将这个计数值加 1。

如果该表项的计数值不为空且它的 $digest$ 和 $digest_2$ 不相同，说明新到达的数据包和 A 表中的相应表项发生冲突，那么我们首先将 A 表中相应表项的计数值和 B 表中 idx 对应的表项的计数值相加并存入 $temp$ 中，然后再将 A 表中 idx 对应的表项置为 $[digest_2, 1]$ 。随后我们比较 $temp$ 和 max 的大小。因为 M 表和 B 表具有相同的表项数目，而且 M 表优先记录大流，而被 B 表记录的数据包一般来自小流，已知在正常的网络中绝大多数的数据包都来自大流，因此 M 表中表项的计数值应该远大于 B 表中表项的记数

值。于是，如果 $temp > max$ ，那么我们就断定测量算法的性能已经下降到一个需要引起注意的程度。而测量算法的性能下降的一个最重要的原因就是主表中表项已经被不活跃的大流占据，从而使得很多其它的流不能有效地在 M 表中积累。这里我们怀疑 max 对应的流是一个不活跃的大流，因此我们引入不活跃大流退出机制，将 M 表中 idx_{max} 对应的表项进行重置，同时将 idx 对应的 B 表的表项置为 0。反之，如果 $temp \leq max$ ，则我们只需要简单将 $temp$ 的值写入 idx 对应的 B 表表项中，相当于将该表项加 1。

以下我们描述 *promote* 和 *reset* 两个算法即算法1和??的算法操作及其逻辑。首先在 *promote* 中，我们的参数包括一个索引值 idx ，新数据流的流标识符的 *digest* 以及对应的计数值。我们在主表中找到 idx 对应的表项并将其导出到控制层，然后将新数据流的 *digest* 和计数值写入到 idx 对应的主表表项中。而在 *reset* 中，我们的参数是主表中待重置表项的索引值 idx ，因此我们找到 idx 对应的主表表项并将其导出到控制层。此后，我们将该表项的计数值置为 0，但是并不会对它的 *digest* 进行更改（即并不会将该表项的 *digest* 域也置为 0），这样的方案设计主要是出于两个方面的原因的考虑。首先如果我们将 idx 对应的表项都置为空，那么 M 表中就可能出现一个数据流存放在多个表项中的情况，比如我们在图5中将 M1 中的一个表项 $M1[x]$ 置为空，另一个流 f 会被映射到 M1 和 M2 中的两个表项 $M1[x]$ 和 $M2[y]$ 且我们已经为 f 在 $M2[y]$ 维护了一个流表项，那么 f 的下一个数据包到达的时候我们检测到 $M1[x]$ 为空，因此还会在 $M1[x]$ 为它建立一个流表项，这样我们在 M 表中就为 f 维护了重复的流表项，造成了内存资源的浪费。如果我们只是将 $M1[x]$ 的计数值置为 0 而保留它的 *digest* 就可以完美避开这个问题。此外，因为主表中被重置的流是一个大流，并且我们不能完全确定它是一个不活跃的大流，相反，它有可能是一个非常活跃的大流，因此我们仍然为它的主表中保留一个表项，如果它真的是一个活跃大流的话它就可以迅速在这个表项中聚集起来，避免了在 A 表中积累最后被 *promote* 的过程，可以有效减少测量误差。

Algorithm 2 *processPacket(p)*

```
1:  $min \leftarrow \infty, max \leftarrow 0, idx_{min} \leftarrow -1, idx_{max} \leftarrow -1, \gamma \leftarrow 5$ 
2:  $digest_1 \leftarrow H_1(p.flowID), digest_2 \leftarrow H_2(p.flowID)$ 
3: for  $i = 1$  to  $d$  do
4:    $idx \leftarrow h_i(p.flowID)$ 
5:   if  $M[idx] == [0, 0]$  then
6:      $M[idx] \leftarrow (digest_1, 1), export(p.flowID)$  return
7:   else if  $M[idx].key == digest_1$  then
8:     Increment  $M[idx].cnt$  by 1 return
9:   else
10:    if  $M[idx].count < min$  then
11:       $min \leftarrow M[idx].cnt, idx_{min} \leftarrow idx$ 
12:    end if
13:    if  $M[idx].count > max$  then
14:       $max \leftarrow M[idx].cnt, idx_{max} \leftarrow idx$ 
15:    end if
16:  end if
17: end for
18:  $idx \leftarrow g(p.flowID)$ 
19: if  $A[idx] == [0, 0]$  then
20:    $A[idx] \leftarrow [digest_2, 1], B[idx] \leftarrow max \% 2^8$ 
21: else if  $A[idx].key == digest_2$  then
22:    $temp \leftarrow A[idx].cnt + 1$ 
23:   if  $temp > min$  then
24:      $export(p.flowID), A[idx] \leftarrow [0, 0]$ 
25:      $promote(idx_{min}, digest_1, temp)$ 
26:   else if  $temp \geq \gamma$  and  $max \% 2^8 == B[idx]$  then
27:      $export(p.flowID), A[idx] \leftarrow [0, 0]$ 
28:      $promote(idx_{max}, digest_1, temp)$ 
29:   else
30:      $A[idx].count = temp$ 
31:   end if
32: else
33:    $A[idx] \leftarrow [digest_2, 1], B[idx] \leftarrow max \% 2^8$ 
34: end if
```
