

49 | 案例篇：内核线程 CPU 利用率太高，我该怎么办？

2019-03-18 倪朋飞

Linux性能优化实战

[进入课程 >](#)



讲述：冯永吉

时长 13:54 大小 12.73M



你好，我是倪朋飞。

上一期，我们一起梳理了，网络时不时丢包的分析定位和优化方法。先简单回顾一下。

网络丢包，通常会带来严重的性能下降，特别是对 TCP 来说，丢包通常意味着网络拥塞和重传，进而会导致网络延迟增大以及吞吐量降低。

而分析丢包问题，还是用我们的老套路，从 Linux 网络收发的流程入手，结合 TCP/IP 协议栈的原理来逐层分析。

其实，在排查网络问题时，我们还经常碰到的一个问题，就是内核线程的 CPU 使用率很高。比如，在高并发的场景中，内核线程 ksoftirqd 的 CPU 使用率通常就会比较高。回顾

一下前面学过的 CPU 和网络模块，你应该知道，这是网络收发的软中断导致的。

而分析 ksoftirqd 这类 CPU 使用率比较高的内核线程，如果用我前面介绍过的那些分析方法，你一般需要借助于其他性能工具，进行辅助分析。

比如，还是以 ksoftirqd 为例，如果你怀疑是网络问题，就可以用 sar、tcpdump 等分析网络流量，进一步确认网络问题的根源。

不过，显然，这种方法在实际操作中需要步骤比较多，可能并不算快捷。你肯定也很想知道，有没有其他更简单的方法，可以直接观察内核线程的行为，更快定位瓶颈呢？

今天，我就继续以 ksoftirqd 为例，带你一起看看，如何分析内核线程的性能问题。

内核线程

既然要讲内核线程的性能问题，在案例开始之前，我们就先来看看，有哪些常见的内核线程。

我们知道，在 Linux 中，用户态进程的“祖先”，都是 PID 号为 1 的 init 进程。比如，现在主流的 Linux 发行版中，init 都是 systemd 进程；而其他的用户态进程，会通过 systemd 来进行管理。

稍微想一下 Linux 中的各种进程，除了用户态进程外，还有大量的内核态线程。按说内核态的线程，应该先于用户态进程启动，可是 systemd 只管理用户态进程。那么，内核态线程又是谁来管理的呢？


实际上，Linux 在启动过程中，有三个特殊的进程，也就是 PID 号最小的三个进程。

0 号进程为 idle 进程，这也是系统创建的第一个进程，它在初始化 1 号和 2 号进程后，演变为空闲任务。当 CPU 上没有其他任务执行时，就会运行它。

1 号进程为 init 进程，通常是 systemd 进程，在用户态运行，用来管理其他用户态进程。


2 号进程为 kthreadd 进程，在内核态运行，用来管理内核线程。

所以，要查找内核线程，我们只需要从 2 号进程开始，查找它的子孙进程即可。比如，你可以使用 ps 命令，来查找 kthreadd 的子进程：

 复制代码

```
1 $ ps -f --ppid 2 -p 2
2 UID      PID    PPID  C  STIME TTY          TIME CMD
3 root         2      0  0  12:02 ?          00:00:01 [kthreadd]
4 root         9      2  0  12:02 ?          00:00:21 [ksoftirqd/0]
5 root        10      2  0  12:02 ?          00:11:47 [rcu_sched]
6 root        11      2  0  12:02 ?          00:00:18 [migration/0]
7 ...
8 root       11094      2  0  14:20 ?          00:00:00 [kworker/1:0-eve]
9 root       11647      2  0  14:27 ?          00:00:00 [kworker/0:2-cgr]
```

从上面的输出，你能够看到，内核线程的名称（CMD）都在中括号里（这一点，我们前面内容也有提到过）。所以，更简单的方法，就是直接查找名称包含中括号的进程。比如：

 复制代码

```
1 $ ps -ef | grep "\[.*\]"
2 root         2      0  0  08:14 ?          00:00:00 [kthreadd]
3 root         3      2  0  08:14 ?          00:00:00 [rcu_gp]
4 root         4      2  0  08:14 ?          00:00:00 [rcu_par_gp]
5 ...
```

了解内核线程的基本功能，对我们排查问题有非常大的帮助。比如，我们曾经在软中断案例中提到过 ksoftirqd。它是一个用来处理软中断的内核线程，并且每个 CPU 上都有一个。

如果你知道了这一点，那么，以后遇到 ksoftirqd 的 CPU 使用高的情况，就会首先怀疑是软中断的问题，然后从软中断的角度来进一步分析。

其实，除了刚才看到的 kthreadd 和 ksoftirqd 外，还有很多常见的内核线程，我们在性能分析中都经常会碰到，比如下面这几个内核线程。

kswapd0：用于内存回收。在 [Swap 变高](#) 案例中，我曾介绍过它的工作原理。

kworker：用于执行内核工作队列，分为绑定 CPU（名称格式为 kworker/CPU86330）和未绑定 CPU（名称格式为 kworker/uPOOL86330）两类。

migration：在负载均衡过程中，把进程迁移到 CPU 上。每个 CPU 都有一个 migration 内核线程。

jbd2/sda1-8：jbd 是 Journaling Block Device 的缩写，用来为文件系统提供日志功能，以保证数据的完整性；名称中的 sda1-8，表示磁盘分区名称和设备号。每个使用了 ext4 文件系统的磁盘分区，都会有一个 jbd2 内核线程。

pdflush：用于将内存中的脏页（被修改过，但还未写入磁盘的文件页）写入磁盘（已经在 3.10 中合并入了 kworker 中）。

了解这几个容易发生性能问题的内核线程，有助于我们更快地定位性能瓶颈。接下来，我们来看今天的案例。

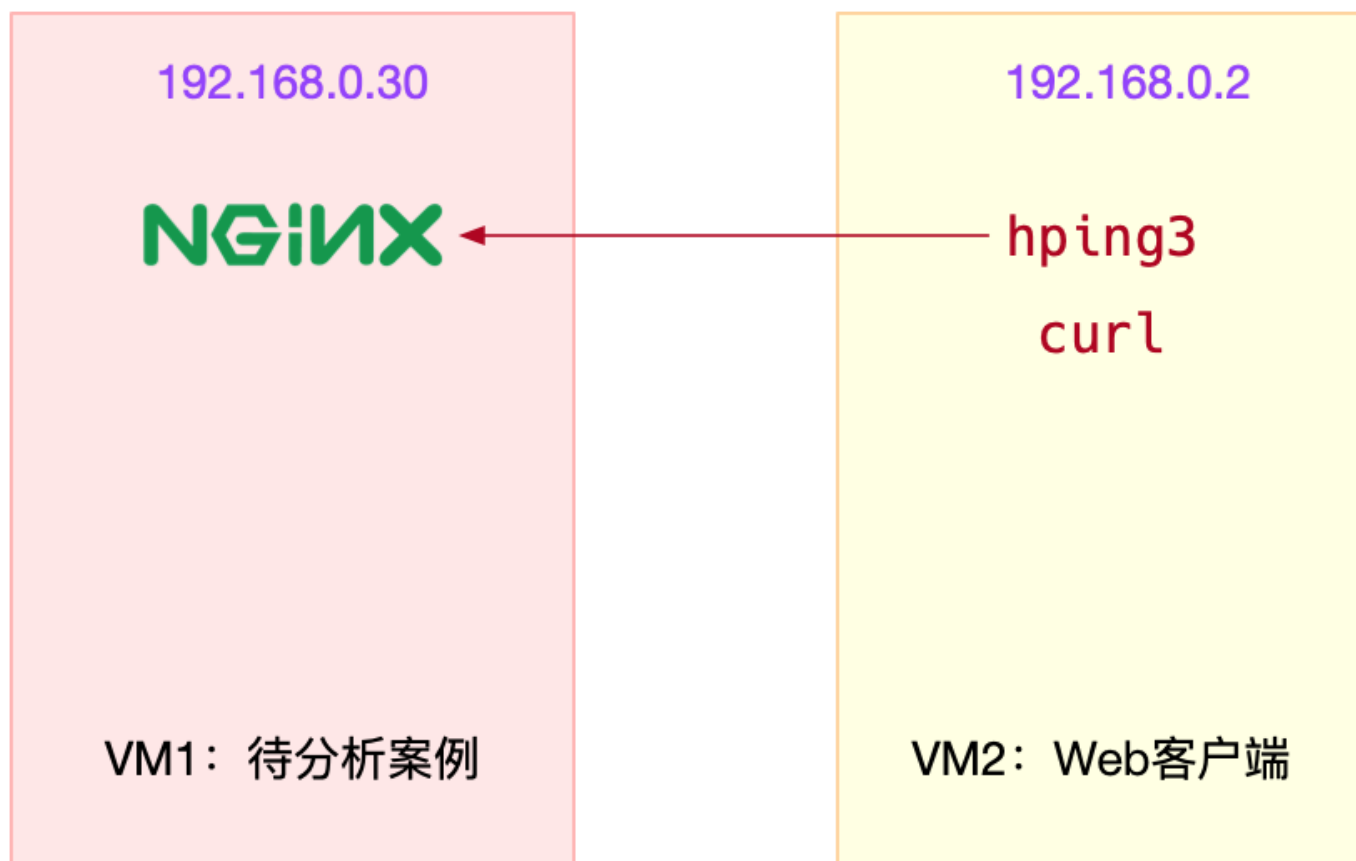
案例准备

今天的案例还是基于 Ubuntu 18.04，同样适用于其他的 Linux 系统。我使用的案例环境如下所示：

机器配置：2 CPU，8GB 内存。

预先安装 docker、perf、hping3、curl 等工具，如 `apt install docker.io linux-tools-common hping3`。

本次案例用到两台虚拟机，我画了一张图来表示它们的关系。



你需要打开两个终端，分别登录这两台虚拟机中，并安装上述工具。

注意，以下所有命令都默认以 root 用户运行，如果你用普通用户身份登陆系统，请运行 `sudo su root` 命令，切换到 root 用户。

如果安装过程有问题，你可以先上网搜索解决，实在解决不了的，记得在留言区向我提问。

到这里，准备工作就完成了。接下来，我们正式进入操作环节。


案例分析

安装完成后，我们先在第一个终端，执行下面的命令运行案例，也就是一个最基本的 Nginx 应用：

 复制代码


```
1 # 运行 Nginx 服务并对外开放 80 端口
2 $ docker run -itd --name=nginx -p 80:80 nginx
```

然后，在第二个终端，使用 curl 访问 Nginx 监听的端口，确认 Nginx 正常启动。假设 192.168.0.30 是 Nginx 所在虚拟机的 IP 地址，运行 curl 命令后，你应该会看到下面这个输出界面：

 复制代码

```
1 $ curl http://192.168.0.30/
2 <!DOCTYPE html>
3 <html>
4 <head>
5 <title>Welcome to nginx!</title>
6 ...
```

接着，还是在第二个终端中，运行 hping3 命令，模拟 Nginx 的客户端请求：

 复制代码

```
1 # -S 参数表示设置 TCP 协议的 SYN（同步序列号），-p 表示目的端口为 80
2 # -i u10 表示每隔 10 微秒发送一个网络帧
3 # 注：如果你在实践中现象不明显，可以尝试把 10 调小，比如调成 5 甚至 1
4 $ hping3 -S -p 80 -i u10 192.168.0.30
```

现在，我们再回到第一个终端，你应该就会发现异常——系统的响应明显变慢了。我们不妨执行 top，观察一下系统和进程的 CPU 使用情况：


 复制代码

```
1 $ top
2 top - 08:31:43 up 17 min,  1 user,  load average: 0.00, 0.00, 0.02
3 Tasks: 128 total,  1 running,  69 sleeping,   0 stopped,   0 zombie
4 %Cpu0  :  0.3 us,  0.3 sy,  0.0 ni, 66.8 id,  0.3 wa,  0.0 hi, 32.4 si,  0.0 st
5 %Cpu1  :  0.0 us,  0.3 sy,  0.0 ni, 65.2 id,  0.0 wa,  0.0 hi, 34.5 si,  0.0 st
6 KiB Mem : 8167040 total, 7234236 free,  358976 used,  573828 buff/cache
7 KiB Swap:      0 total,      0 free,      0 used. 7560460 avail Mem
8
9  PID USER      PR  NI   VIRT   RES    SHR S  %CPU  %MEM    TIME+  COMMAND
10    9 root      20   0     0     0     0 S   7.0   0.0   0:00.48 ksoftirqd/0
11   18 root      20   0     0     0     0 S   6.9   0.0   0:00.56 ksoftirqd/1
12 2489 root      20   0 876896 38408 21520 S   0.3   0.5   0:01.50 docker-containe
13 3008 root      20   0 44536   3936 3304 R   0.3   0.0   0:00.09 top
14    1 root      20   0 78116   9000 6432 S   0.0   0.1   0:11.77 systemd
15 ...
```


从 top 的输出中，你可以看到，两个 CPU 的软中断使用率都超过了 30%；而 CPU 使用率最高的进程，正好是软中断内核线程 ksoftirqd/0 和 ksoftirqd/1。

虽然，我们已经知道了 ksoftirqd 的基本功能，可以猜测是因为大量网络收发，引起了 CPU 使用率升高；但它到底在执行什么逻辑，我们却并不知道。

对于普通进程，我们要观察其行为有很多方法，比如 strace、pstack、lsof 等等。但这些工具并不适合内核线程，比如，如果你用 pstack，或者通过 /proc/pid/stack 查看 ksoftirqd/0（进程号为 9）的调用栈时，分别可以得到以下输出：

 复制代码

```
1 $ pstack 9
2 Could not attach to target 9: Operation not permitted.
3 detach: No such process
```

 复制代码

```
1 $ cat /proc/9/stack
2 [<0>] smpboot_thread_fn+0x166/0x170
3 [<0>] kthread+0x121/0x140
4 [<0>] ret_from_fork+0x35/0x40
5 [<0>] 0xffffffffffffffff
```


显然，pstack 报出的是不允许挂载进程的错误；而 /proc/9/stack 方式虽然有输出，但输出中并没有详细的调用栈情况。

那还有没有其他方法，来观察内核线程 ksoftirqd 的行为呢？

既然是内核线程，自然应该用到内核中提供的机制。回顾一下我们之前用过的 CPU 性能工具，我想你肯定还记得 perf，这个内核自带的性能剖析工具。

perf 可以对指定的进程或者事件进行采样，并且还可以用调用栈的形式，输出整个调用链上的汇总信息。我们不妨就用 perf，来试着分析一下进程号为 9 的 ksoftirqd。

继续在终端一中，执行下面的 `perf record` 命令；并指定进程号 9，以便记录 `ksoftirqd` 的行为：

 复制代码

```
1 # 采样 30s 后退出
2 $ perf record -a -g -p 9 -- sleep 30
```

稍等一会儿，在上述命令结束后，继续执行 `perf report` 命令，你就可以得到 `perf` 的汇总报告。按上下方向键以及回车键，展开比例最高的 `ksoftirqd` 后，你就可以得到下面这个调用关系链图：

```
Samples: 598 of event 'cpu-clock', Event count (approx.): 149500000
Children      Self  Command      Shared Object      Symbol
- 100.00%      0.00%  ksoftirqd/0  [kernel.kallsyms]  [k] ret_from_fork
  ret_from_fork
- kthread
  - 99.83% smpboot_thread_fn
    - 97.16% run_ksoftirqd
      - 96.82% __softirqentry_text_start
        - 89.80% net_rx_action
          - 75.42% process_backlog
            - 73.91% __netif_receive_skb
              - 73.41% __netif_receive_skb_core
                - 44.82% br_handle_frame
                  - nf_hook_slow
                  - br_nf_pre_routing
                    - 33.28% br_nf_pre_routing_finish
                      - br_nf_hook_thresh
                        - 31.61% br_handle_frame_finish
                          - 30.10% br_pass_frame_up
                            - br_netif_receive_skb
                              netif_receive_skb
                              - netif_receive_skb_internal
                                - __netif_receive_skb
                                  - __netif_receive_skb_core
                                    - ip_rcv
                                      - 27.93% nf_hook_slow
                                        - 27.59% ip_sabotage_in
                                          + 27.26% ip_rcv_finish
                                          + 8.53% nf_hook_slow
                                          + 0.84% kmem_cache_alloc_trace
                                          0.50% setup_pre_routing
                                          + 27.09% ip_rcv
                                          + 13.88% netvsc_poll
                                          + 0.50% __kfree_skb_flush
                                          + 3.01% rcu_process_callbacks
                                          + 2.51% net_tx_action
                                          + 0.84% run_rebalance_domains
                                          + 0.67% run_timer_softirq
                                          + 2.17% schedule
+ 100.00%      0.00%  ksoftirqd/0  [kernel.kallsyms]  [k] kthread
```


从这个图中，你可以清楚看到 ksoftirqd 执行最多的调用过程。虽然你可能不太熟悉内核源码，但通过这些函数，我们可以大致看出它的调用栈过程。

net_rx_action 和 netif_receive_skb，表明这是接收网络包（rx 表示 receive）。

br_handle_frame，表明网络包经过了网桥（br 表示 bridge）。

br_nf_pre_routing，表明在网桥上执行了 netfilter 的 PREROUTING（nf 表示 netfilter）。而我们已经知道 PREROUTING 主要用来执行 DNAT，所以可以猜测这里有 DNAT 发生。

br_pass_frame_up，表明网桥处理后，再交给桥接的其他桥接网卡进一步处理。比如，在新的网卡上接收网络包、执行 netfilter 过滤规则等等。

我们的猜测对不对呢？实际上，我们案例最开始用 Docker 启动了容器，而 Docker 会自动为容器创建虚拟网卡、桥接到 docker0 网桥并配置 NAT 规则。这一过程，如下图所示：

```
-A DOCKER ! -i docker0 -p tcp -m tcp --dport 80  
-j DNAT --to-dzdestination 172.17.0.2:80
```

iptables

```
nginx -g daemon off;
```

Docker容器

172.17.0.2

eth0

172.17.0.1

vethfc86b9e

docker0网桥

Destination	Gateway	Genmask	Iface
172.17.0.0	0.0.0.0	255.255.0.0	docker0

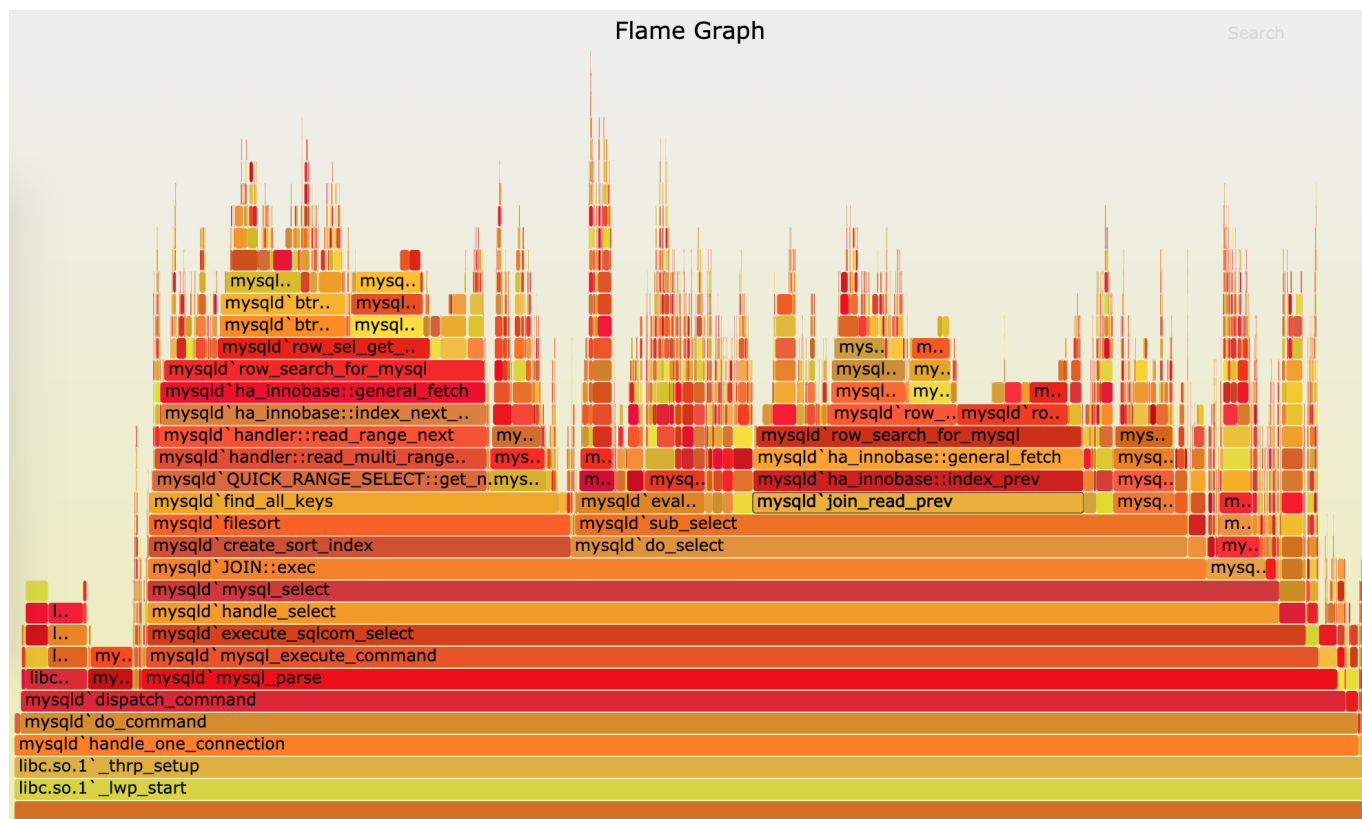
路由表

当然了，前面 perf report 界面的调用链还可以继续展开。但很不幸，我的屏幕不够大，如果展开更多的层级，最后几个层级会超出屏幕范围。这样，即使我们能看到大部分的调用过程，却也不能说明后面层级就没问题。

那么，有没有更好的方法，来查看整个调用栈的信息呢？

火焰图

针对 perf 汇总数据的展示问题，Brendan Gragg 发明了火焰图，通过矢量图的形式，更直观展示汇总结果。下图就是一个针对 mysql 的火焰图示例。



(图片来自 Brendan Gregg 博客)

这张图看起来像是跳动的火焰，因此也就被称为火焰图。要理解火焰图，我们最重要的是区分清楚横轴和纵轴的含义。

横轴表示采样数和采样比例。一个函数占用的横轴越宽，就代表它的执行时间越长。同一层的多个函数，则是按照字母来排序。

纵轴表示调用栈，由下往上根据调用关系逐个展开。换句话说，上下相邻的两个函数中，下面的函数，是上面函数的父函数。这样，调用栈越深，纵轴就越高。

另外，要注意图中的颜色，并没有特殊含义，只是用来区分不同的函数。

火焰图是动态的矢量图格式，所以它还支持一些动态特性。比如，鼠标悬停到某个函数上时，就会自动显示这个函数的采样数和采样比例。而当你用鼠标点击函数时，火焰图就会把该层及其上的各层放大，方便你观察这些处于火焰图顶部的调用栈的细节。

上面 mysql 火焰图的示例，就表示了 CPU 的繁忙情况，这种火焰图也被称为 on-CPU 火焰图。如果我们根据性能分析的目标来划分，火焰图可以分为下面这几种。

on-CPU 火焰图：表示 CPU 的繁忙情况，用在 CPU 使用率比较高的场景中。

off-CPU 火焰图：表示 CPU 等待 I/O、锁等各种资源的阻塞情况。

内存火焰图：表示内存的分配和释放情况。


热 / 冷火焰图：表示将 on-CPU 和 off-CPU 结合在一起综合展示。

差分火焰图：表示两个火焰图的差分情况，红色表示增长，蓝色表示衰减。差分火焰图常用来比较不同场景和不同时期的火焰图，以便分析系统变化前后对性能的影响情况。

了解了火焰图的含义和查看方法后，接下来，我们再回到案例，运用火焰图来观察刚才 perf record 得到的记录。

火焰图分析

首先，我们需要生成火焰图。我们先下载几个能从 perf record 记录生成火焰图的工具，这些工具都放在 <https://github.com/brendangregg/FlameGraph> 上面。你可以执行下面的命令来下载：


 复制代码

```
1 $ git clone https://github.com/brendangregg/FlameGraph
2 $ cd FlameGraph
```

安装好工具后，要生成火焰图，其实主要需要三个步骤：

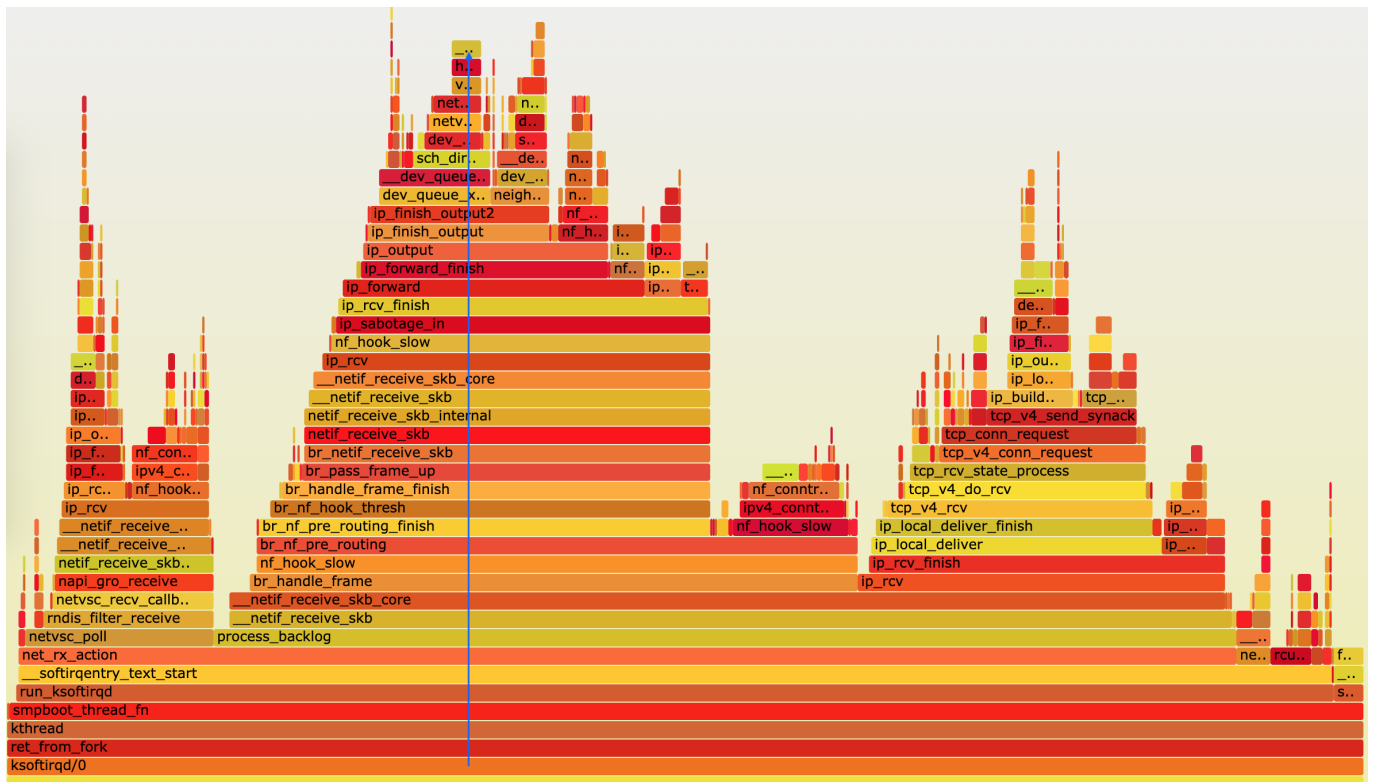
1. 执行 perf script，将 perf record 的记录转换成可读的采样记录；
2. 执行 stackcollapse-perf.pl 脚本，合并调用栈信息；
3. 执行 flamegraph.pl 脚本，生成火焰图。

不过，在 Linux 中，我们可以使用管道，来简化这三个步骤的执行过程。假设刚才用 perf record 生成的文件路径为 /root/perf.data，执行下面的命令，你就可以直接生成火焰图：

 复制代码

```
1 $ perf script -i /root/perf.data | ./stackcollapse-perf.pl --all | ./flamegraph.pl > k:
```

执行成功后，使用浏览器打开 ksoftirqd.svg，你就可以看到生成的火焰图了。如下图所示：



根据刚刚讲过的火焰图原理，这个图应该从下往上看，沿着调用栈中最宽的函数来分析执行次数最多的函数。这儿看到的结果，其实跟刚才的 perf report 类似，但直观了很多，中间这一团火，很明显就是最需要我们关注的地方。

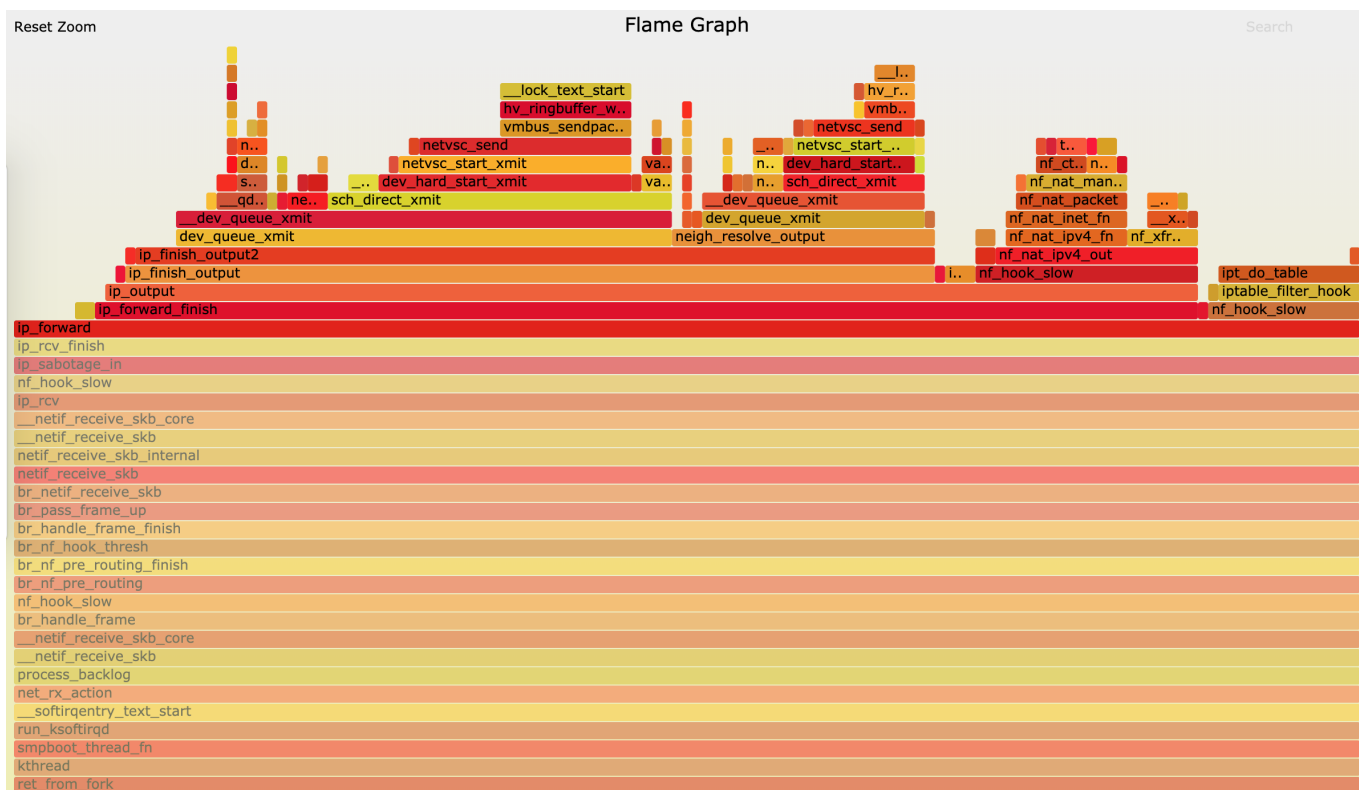
我们顺着调用栈由下往上看（顺着图中蓝色箭头），就可以得到跟刚才 perf report 中一样的结果：

最开始，还是 net_rx_action 到 netif_receive_skb 处理网络收包；

然后，br_handle_frame 到 br_nf_pre_routing，在网桥中接收并执行 netfilter 钩子函数；

再向上，`br_pass_frame_up` 到 `netif_receive_skb`，从网桥转到其他网络设备又一次接收。

不过最后，到了 `ip_forward` 这里，已经看不清函数名称了。所以我们需要点击 `ip_forward`，展开最上面这一块调用栈：



这样，就可以进一步看到 `ip_forward` 后的行为，也就是把网络包发送出去。根据这个调用过程，再结合我们前面学习的网络收发和 TCP/IP 协议栈原理，这个流程中的网络接收、网桥以及 netfilter 调用等，都是导致软中断 CPU 升高的重要因素，也就是影响网络性能的潜在瓶颈。

不过，回想一下网络收发的流程，你可能会觉得它缺了好多步骤。

比如，这个堆栈中并没有 TCP 相关的调用，也没有连接跟踪 `conntrack` 相关的函数。实际上，这些流程都在其他更小的火焰中，你可以点击上图左上角的“Reset Zoom”，回到完整火焰图中，再去查看其他小火焰的堆栈。

所以，在理解这个调用栈时要注意。从任何一个点出发、纵向来看的整个调用栈，其实只是最顶端那一个函数的调用堆栈，而非完整的内核网络执行流程。

另外，整个火焰图不包含任何时间的因素，所以并不能看出横向各个函数的执行次序。

到这里，我们就找出了内核线程 ksoftirqd 执行最频繁的函数调用堆栈，而这个堆栈中的各层级函数，就是潜在的性能瓶颈来源。这样，后面想要进一步分析、优化时，也就有了根据。

小结

今天这个案例，你可能会觉得比较熟悉。实际上，这个案例，正是我们专栏 CPU 模块中的[软中断案例](#)。

当时，我们从软中断 CPU 使用率的角度入手，用网络抓包的方法找出了瓶颈来源，确认是测试机器发送的大量 SYN 包导致的。而通过今天的 perf 和火焰图方法，我们进一步找出了软中断内核线程的热点函数，其实也就找出了潜在的瓶颈和优化方向。

其实，如果遇到的是内核线程的资源使用异常，很多常用的进程级性能工具并不能帮上忙。这时，你就可以用内核自带的 perf 来观察它们的行为，找出热点函数，进一步定位性能瓶。当然，perf 产生的汇总报告并不够直观，所以我也推荐你用火焰图来协助排查。

实际上，火焰图方法同样适用于普通进程。比如，在分析 Nginx、MySQL 等各种应用场景的性能问题时，火焰图也能帮你更快定位热点函数，找出潜在性能问题。

思考

最后，我想邀请你一起来聊聊，你碰到过的内核线程性能问题。你是怎么分析它们的根源？又是怎么解决的？你可以结合我的讲述，总结自己的思路。

欢迎在留言区和我讨论，也欢迎把这篇文章分享给你的同事、朋友。我们一起在实战中演练，在交流中进步。

Linux 性能优化实战

10 分钟帮你找到系统瓶颈

倪朋飞

微软资深工程师
Kubernetes 项目维护者



新版升级：点击「 请朋友读」，10位好友免费读，邀请订阅更有**现金**奖励。

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 48 | 案例篇：服务器总是时不时丢包，我该怎么办？（下）

下一篇 50 | 案例篇：动态追踪怎么用？（上）

精选留言 (8)

 写留言



李逍遥

2019-04-01

 1

cpu火焰图和内存火焰图，在生成数据时有什么不同？

展开 ▾

作者回复: 火焰图的结构是一样的，只是函数堆栈不一样，内存火焰图侧重于内存管理函数的调用栈



如果

2019-04-17



DAY49，打卡

展开 ∨



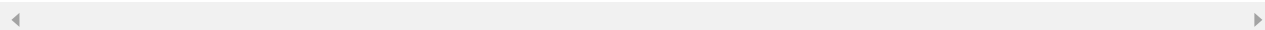
李逍遥

2019-04-03



老师，能讲讲内存火焰图生成perf.data数据时,perf record加哪些选项吗？

作者回复: 要加上内存管理相关的事件（函数），比如perf record -e syscalls:sys_enter_mmap -a -g -- sleep 60



青石

2019-03-22



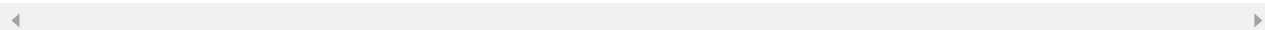
两周时间，终于追上来了。

请问老师，有哪些书有助于通过内核函数来定位故障，Linux用了9年，看到这还是感觉有些吃力。

...

展开 ∨

作者回复: 内核里面其实就提供了很多工具，可以参考下50和51篇中的动态追踪方法



行者

2019-03-19



很赞，准备回去用火焰图分析下我们后端服务。^_^

展开 ∨



2xshu

2019-03-18



老师，这是最后一节课程吗？

展开 ∨

作者回复: 不是，看原来的目录，还有好些篇





我来也

2019-03-18



[D49打卡]

之前用火焰图分析过golang程序的内存分配及cpu使用率情况.感觉非常直观.能快速找到瓶颈.

展开 ∨

作者回复: 嗯嗯 Go内置了pprof 工具，用起来更简单



ninuxer

2019-03-18



打卡day52

有碰到一个内核问题，docker宿主机上kworker/u80进程的cpu占用率一直100%，其他的kworker进程都正常，每隔几个月就会碰到一次，为了快速恢复业务，就直接重启了，主要是没办法在线下实验的时候复现问题，所以就没有深入的分析，后面碰到后，可以用老师的方法，把perf record采集一段时间的调用信息，然后拿出去分析下👍

展开 ∨

作者回复: 嗯嗯