

路由器组实验报告

陈嘉杰	赵博文
计 72 班	计 72
2017011484	2017011410

2019 年 6 月 30 日

目录

1	项目概况	2
1.1	项目目标	2
1.2	项目结构	2
2	具体实现	3
2.1	硬件部分 (NaiveRouter)	3
2.1.1	总体架构	3
2.1.2	转发矩阵	4
2.1.3	ARP 表	4
2.1.4	转发表	5
2.1.5	核心转发逻辑	5
2.2	软件部分 (ARM/MicroBlaze over AX7021/Pynq)	6
3	性能表现	7
4	总结	8

1 项目概况

1.1 项目目标

路由器项目的目标是，在 FPGA 上实现一个四口路由器，实现硬件的三层转发功能，并且把数据平面的工作转交 CPU 上的软件实现，允许软件动态更新转发表并且读取统计数据。

除了转发功能，硬件部分还应该实现以下的目标：

1. 四个端口全双工
2. 保证以完整的以太网帧单位进行丢包
3. 保证各端口之间流量的公平性

除了硬件以外，软件部分还需要重新实现网络原理课程的实验内容，即实现一个支持 RIP 协议的路由，它从硬件部分读取部分需要处理的以太网帧，并实现 RIP 协议与链路上的其它 RIP 路由器进行路由信息的交换。它应该实现这些功能：

1. 正确响应 ARP 请求
2. 定时广播自己的 RIP 路由表信息
3. 接收并解析 RIP 信息，更新路由表
4. 定时对路由表表项进行更新，并写入到硬件的转发表

为了展示效果，额外添加了 HDMI 的输出，使得用户可以直观地看到当前的路由表信息和各个端口进出的流量。

1.2 项目结构

为了支持更多平台和将来的使用，项目的结构比较复杂，主要分为以下几个子项目：

naiverouter 封装成 IP 的路由转发核心，提供和 CPU 交换数据的通道和四个 RGMII 接口。

router 在 AX7021 平台上, 软件运行在 ARM 处理器上的完整路由器实现, 在 Xilinx SDK 中采用 C 语言实现了 RIP 协议和 HDMI 的可视化输出。

router_mb 也是在 AX7021 平台上, 软件则是运行在 FPGA 中的 MicroBlaze 核, 在 Xilinx SDK 中实现了与路由器的交互逻辑, 实现了 ARP 的响应和转发表的读取。

router_ksz8795 在 Pynq-Z1 开发板外接一个带有 KSZ8795 和四个网口的扩展板平台上, 软件运行在 FPGA 中的 MicroBlaze 核, 采用软路由的方式进行转发, 底层采用的是新设计的统一接口的 HAL 库。

其中 **router** 项目为最早出现的子项目, 首先作为一个纯硬件项目开始开发, 实现完硬件转发后, 开始实现软件部分, 继续扩展后, 为了测试在不同平台和情况下的使用, 把它分离出单独的 **naiverouter** 项目, 以一个独立的 IP 的形式加入到其余的项目之中。

2 具体实现

2.1 硬件部分 (NaiveRouter)

2.1.1 总体架构

考虑到需要保证四个端口同时互相转发的流量, 在设计的时候选择了如下的方案:

- 设计一个 4×4 (后来加上到 CPU 之后实际上是 5×5) 的转发通路, 每一个端口都可以向每一个端口发送以太网帧 (包括自己), 每个端口通过轮询的方式选择从哪个端口接收数据, 保证公平性。
- 设计了一个全局的 ARP 表, 通过仲裁的方式保证端口之间操作的原子性。考虑到操作 ARP 表使用的周期相比数据并不多, 所以并没有为每个端口设置一个 ARP 表。即使是每个端口一个 ARP 表, 也不能解决转发目标是同一个端口时, 需要同时查询同一个 ARP 表的问题, 但可以减少仲裁的等待时间。

- 设计了一个全局的转发表，和 ARP 表类似。出于同样的考虑，没有在每个端口设置一个转发表，但设置多个转发表确实可以免去仲裁的一步，只是在软件更新转发表的时候需要更多一步操作。

2.1.2 转发矩阵

转发矩阵是一组 4×4 (5×5) 交叉连接的接口，每个接口包含这些端口：

wdata 逐字节的数据

wlast 表示一个以太网帧最后一个字节

wvalid 表示发送端可以发送数据

wready 表示接收端可以接收数据

只有当 **wvalid** 和 **wready** 同时为高时，才会传输数据，与 AXI-Stream 类似。但与 AXI-Stream 不同的是，为了简化逻辑，这里的 **wvalid** **wready** **wdata** 并不在同一个周期上升，而是等待一个周期后开始正式传输。

对于连接到物理网口的端口来说，并不需要区分它来自哪里，但是软件部分需要按照这个来做一些处理，也需要特定的方法告诉硬件部分应该从哪个端口出。因此，额外添加了一段逻辑，在以太网帧最前面加上一个数字，代表端口号，这样就可以区分是从哪个端口入，需要从哪个端口出。

2.1.3 ARP 表

前面已经提到过，为什么采用了全局的 ARP 表而没有选择每个端口单独一个 ARP 表。它的实现也很简单，就是在 BRAM 中保存一个简单的哈希表，简单按照 IP 地址选择后，就按顺序在桶内部顺序查找。更新也是类似，找到对应的桶后，如果找不到对应的 ARP 表项，就把新的 ARP 表项插入到最前面。由于不需要支持太多设备，所以这个表并不是很大。

它提供了简单的接口，一个是查询，一个更新。采用了类似的 **valid** 和 **ready** 信号，最后输出查询的结果和插入的完成信息。在外层套一个仲裁，就变成了实际使用的 ARP 表。

在写入 ARP 表的时机选择上，采取了接受到一个 ARP 请求/回复的时候，按照 Sender IP 和 Sender MAC Address 来插入。这样免去了在大量 IP 转发时不断更新 ARP 表，也能保证正确性和效率。

在 `router/docs/` 下有一个单独的 ARP 表的文档。

2.1.4 转发表

转发表和 ARP 表类似，也是一个数据结构，但是为了保证最长匹配，要求转发表中的表项按照前缀长度不降来排列，这样只要找到第一条匹配的，就可以保证是最长匹配。有一些论文探讨了如何采用更高效的树的接口来进行同样的操作，在本次实验中并没有实验，留作后人继续改进。

它提供了简单的接口，一个是查询，一个是 BRAM 的接口，用于转发表的更新。查询也采用了类似的 valid 和 ready 信号，最后输出查询的结果。也在外层加了一个仲裁，然后给各个端口使用。

在实现了软件动态更新转发表之前，通过初始化的数据实现了一个静态的转发表。通过把 BRAM 的接口暴露出去，接到 AXI BRAM Controller 后，就可以很方便地实现转发表的动态更新。

2.1.5 核心转发逻辑

这是最复杂的部分，包含两个方向的数据通路，和多个部分进行互操作，在每一个端口下都有同样的一份逻辑。它有两种工作模式：一个是纯硬件，在硬件中处理 ARP 的回应和 ARP 表查询不到时发出对应的请求；一个是软硬结合，把符合一定条件的以太网帧都发送给 CPU 交由软件处理，剩下就按照转发表进行处理。

首先是从物理网口开始，到转发引擎，修改后再转发出去的数据通路，也是比较复杂的一段。主要分以下几个流水线步骤：

1. 从 MAC 过来的数据要求接受者随时可以接收，所以添加了一个 FIFO 进行缓存。但是现成的 FIFO 并不支持以完整的以太网帧的单位进行舍弃，于是拆分成了两个 FIFO，一个存数据，一个存长度，先写入数据后写入长度，保证原子性。在剩余空间不足一个完整的以太网帧的时候，直接丢弃。
2. 从上一步读取一个以太网帧，先读长度后读数据，和上面匹配。在读取的同时，进行一系列的解析和处理：拆分出需要特殊处理的一些数据，如接受者 MAC，发送者 MAC，EtherType，ARP 和 IP 的信息。
3. 如果是 ARP，提取出它的 Sender IP 和 Sender MAC，保存到 ARP 表中。如果是纯硬件转发模式，如果 Target IP 匹配到自己的地址，需要构造一个回应。否则就选择转发给 CPU。

4. 如果是 IP，判断目的地址，如果是广播和组播地址，就转发给 CPU；否则，查询转发表，得到下一跳的 IP 地址和出端口信息，接着查询下一跳的 MAC 地址，得到新的目的 MAC 地址和 IP 头中 TTL 和 Checksum。
5. 如果前两步得到了需要发送的结果，向指定的端口发送以太网帧，即拉高 valid，等待对方 ready 后开始传输，传输到最后一个字节 last 拉高，valid 拉低，完成一次完整的转发操作。

以上的步骤，都是流水线操作，等到前一步得到足够的信息后立即开始下一步，如转发 IP 包时，只要读取到 IP 头中的目的 IP 地址信息就开始查询，这样可以保证转发的效率，这就是为什么把 ARP 表和转发表放全局并不会带来太多的性能损失的原因。

2.2 软件部分 (ARM/MicroBlaze over AX7021/Pynq)

在实现完硬件部分后，就开始了软件部分的编写。最初的目标就是实现一个 RIP 路由器，后来在这个基础上又增加了 HDMI 的可视化输出功能，最后移植一部分功能到 MicroBlaze 和 Pynq-Z1 with KSZ8795 平台上。

最初实现一个可用的 ARM 上运行的软硬结合的路由器大概需要这些步骤：

- 修改硬件部分，使得它可以给 CPU 收/发以太网帧，也可以让 CPU 读写转发表，并读取统计信息，具体的实现方法在上面硬件部分已经有讲述。
- 在 Xilinx SDK 中采用 Xilinx 提供的 BSP 里对应的驱动：AXI Bram Controller, AXI-Stream FIFO 和 AXI GPIO 来和硬件部分交互，分别负责转发表的更新，以太网帧的收发和统计数据的读取。
- 接着，用 C 代码实现简单的轮询，不断从 AXI-Stream FIFO 中读取以太网帧，并注册一个时钟中断，每秒进行一次更新，输出当前状态并把路由表写入转发表。
- 接着实现 ARP 响应，RIP 的接收和广播，按照规则更新路由表。
- 最后添加 HDMI 输出，通过 VDMA 把 FrameBuffer 更新到视频输出，以 20fps 的帧率更新显示，手动绘制各个图案和文字。

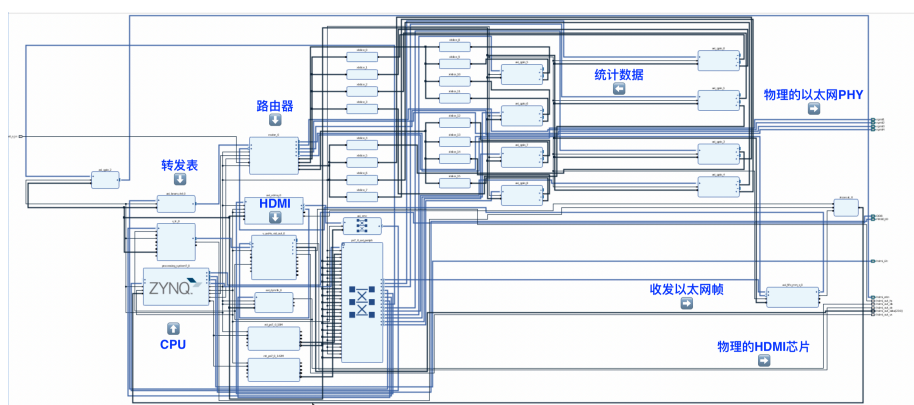


图 1: 组件之间连接的图示

接着就是把上面的部分工作迁移到 MicroBlaze 上，实际上做的事情基本一样，不再赘述。

之后做的一件事情是在 Pynq-Z1 开发板上外接 KSZ8795 的开发板，通过软件配置好 SPI 的寄存器后，就可以通过一个千兆网口实现四个百兆网口的转发，通过 VLAN 来实现端口收发的控制，类似于在上面硬件部分中额外添加一个字节的函数。

3 性能表现

在实现完纯硬件的转发逻辑后，进行了一系列的性能测试，一个端口收一个端口发，可以做到 950Mbps 的速率，如果是 UDP 小包则是大约 115000 pps 的速度，两个数据都已经比较接近千兆的限制了。虽然转发引擎采用了流水线的方式，但在继续提高运行频率 (>250MHz) 的时候遇到了困难，出现很多新的时序问题。如果要继续优化，应该需要更加精细设计的流水线结构，并减少在仲裁上等待的时间。

添加软件逻辑后，因为 AXI 外设速度限制的缘故，运行频率到达 150MHz 左右就会到达极限，此时用 iperf3 测速大概能到 400Mbps 的速度。如何正确地分离 AXI 外设的时钟和路由器内部进行转发的时钟并且保证正确性，是下一步需要进行的实践。

在 Pynq-Z1 平台上采用 MicroBlaze CPU 进行软路由时运行，性能就相对比较低，只有 20Mbps 的水平，但其实树莓派上软路由转发的性能也差

不多，所以算是正常水平。为了实现高效的三层转发，硬件实现是十分有必要的。

4 总结

这次路由器项目实现了硬件转发的路由器，在性能上得到了很好的效果，并且在软件上实现了控制平面的逻辑，实现了控制平面和转发平面的分离。在这个过程中，学会了很多硬件项目编写的技巧，如编写多个小模块分别编写测试，不断仿真来实现想要的效果；实现简单的一个流水线，充分发挥硬件可以同时处理不同的事情的能力；灵活应用逻辑分析仪，查看在实际硬件上得到的波形和仿真是否一致，在一些情况下，特别是高频率的时候，它们可能会有不同的结果，虽然都是符合标准的，但一些细节上仿真并不会体现出来；跨越时钟域的数据传输的时候，采用一个 Async FIFO 进行缓冲。这些经验对下学期计算机组成原理课都会有巨大的作用。