

网络控制器 TSNLight 设计文档 (V1.1)

OpenTSN 开源项目组

2019 年 5 月

版本历史

[illegible]

目录

1、TSNLight 概述	5
1.1、简介	5
1.2、架构与功能	5
2、核心服务层基础模块	9
2.1 拓扑管理模块	10
2.1.1 功能描述	10
2.1.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
2.2 资源管理模块	10
2.2.1 功能描述	10
2.2.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
2.3 流管理模块	12
2.3.1 功能描述	12
2.3.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
2.4 调度管理模块	12
2.4.1 功能描述	12
2.4.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
2.5 状态管理模块	13
2.5.1 功能描述	13
2.5.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
3、通信库	14
3.1 南向通信 I/O 库	15
3.1.1 功能描述	15
3.1.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
3.2 北向通信 I/O 库	15
3.2.1 功能描述	15
3.2.2 对外编程接口	错误!未定义书签。
4、示例应用	16
4.1 TSNSTM 设计	16

4.1.1 整体架构.....	16
4.2 TSNAnalyzer 设计.....	18
4.2.1 整体架构.....	18
4.3 TSNInsight 设计.....	19
4.3.1 整体架构.....	20
4.3.2 对外编程接口	错误!未定义书签。

OpenTSN

1、TSNLight 概述

1.1、简介

TSNLight 为 OpenTSN 的控制平面功能，其中包括拓扑管理、资源管理、流管理、调度管理和状态管理等功能，并根据核心模块开发的基础应用有 TSNAnalyzer 和 TSNSTM。

1.2、架构与功能

TSNLight 整体架构可以分为三部分，即核心服务层、通信库和用户应用层。其中在核心服务层中，包含基础模块和基础应用，基础模块为基础应用提供 API 服务，基础应用依赖核心服务层，也可为用户应用层提供服务；通信库提供基础应用与数据平面和用户应用之间的通信接口；而用户应用层只能通过北向 I/O 通信库访问到基础应用层的数据，不能访问到核心服务层的内容。

TSNLight 整体架构如下图所示。

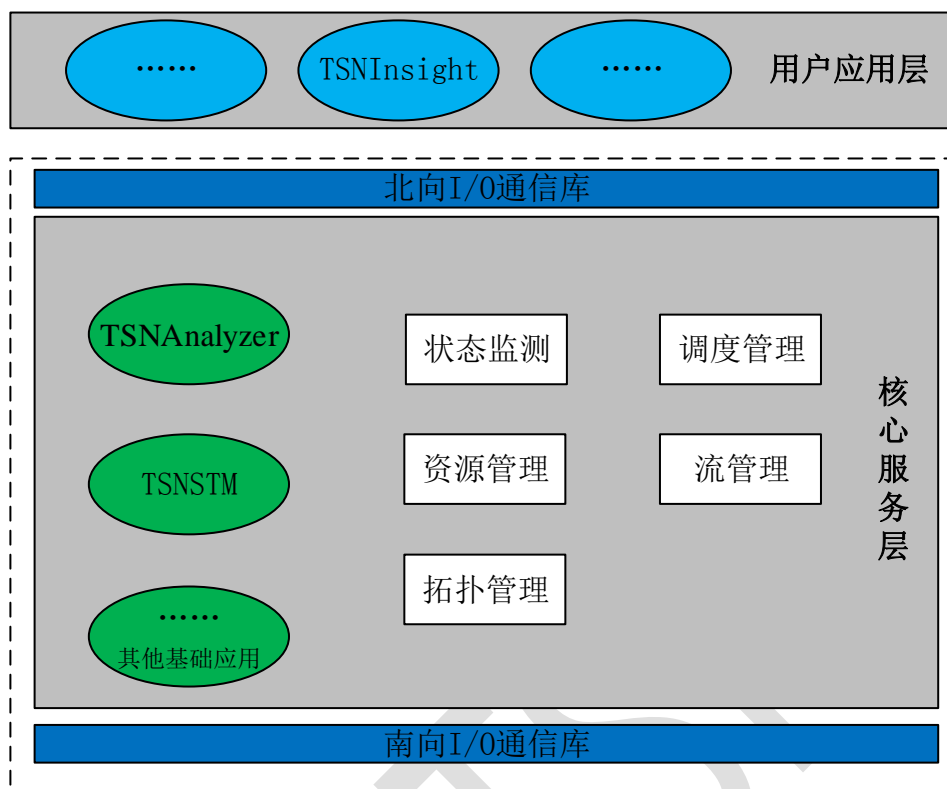


图 1-1 TSNLight 整体架构

核心服务层包含基础模块和基础应用，基础模块主要用于为基础应用提供 API 服务，包含的模块有拓扑管理、资源管理、流管理、调度管理和状态管理，基础应用包含 TSNSTM 和 TSNAnalyzer 两个模块，主要面向于 TSN 交换机并提供基础应用服务，如配置 TSN 交换机、分析当前网络流量等。

- 资源管理模块：管理交换节点的带宽、队列长度、控制信息等资源信息，提供资源管理相关的 API。用于对资源进行初始化，提供资源的状态和对资源进行更新。

- 拓扑管理模块：管理交换节点和端系统的地址，标识号和连接关系等信息，提供拓扑管理相关的 API。提供当前拓扑的状态，状态监测根据根据拓扑信息判断当前所有节点的状态。

- 流管理模块：管理当前 TSN 网络中需要预约资源的流量特征，

主要包括时间敏感流和带宽约束流，提供资源预约相关的 API。资源调度分配根据资源预约模块获取当前的流特征。

- 调度管理模块：根据全局资源和拓扑信息对预约资源的流量进行资源调度与分配，目前主要采取离线模式进行预先资源规划。提供资源调度相关的 API。通过拓扑管理和资源预约计算出最佳路径，生成配置信息。

- 状态管理模块：对当前网络状态进行监测，如时间同步状况、当前网络队列信息等，提供状态监测相关的 API。根据拓扑和接收到的报文判断当前的所有交换节点的网络状态。

- TSNSTM 模块：静态流管理器，基于静态的方式对 TSN 流和非 TSN 流进行管理和配置。

- TSNAnalyzer 模块：流量分析器，基于 Beacon 机制的轻量级网络信息收集与管理。同时也为用户应用层提供服务，如为 TSNInsight 提供网络状态报文的精确硬件时间戳等。

通信库包含的模块有南向通信 I/O 库和北向通信 I/O 库，用于控制平面和数据平面、控制平面与用户应用之间的通信。

- 南向 I/O 通信库：用于与 TSN 交换机和 TSN 控制器之间的通信，提供与 FPGA 进行通信的 API。主要用于通过发送报文对交换节点进行配置和接收报文对状态进行分析，在基础应用中 TSNSTM 用于该模块发送报文，TSNAnalyzer 用于该模块接收报文。

- 北向 I/O 通信库：用于基础应用层和用户应用层之间的通信，提供应用层之间通信的 API。TSNAnalyzer 通过该模块发送到用户应

用层网络状态信息，包括时间同步和队列状态。

用户应用层主要面向于用户，为用户提供应用服务，如可视化界面等。目前仅包含 TSNInsight 模块。后续可根据需求进一步扩展。

● TSNInsight 模块：可视化界面，可向用户展示当前网络同步状态信息、流特征信息、TSN 交换机队列信息等。

拓扑图如下图所示，其中 TSNSTM 和 TSNInsight 是在 PC 上实现，TSN_Analyzer 是在 openbox 中实现，各个交换节点也是用 openbox 实现。

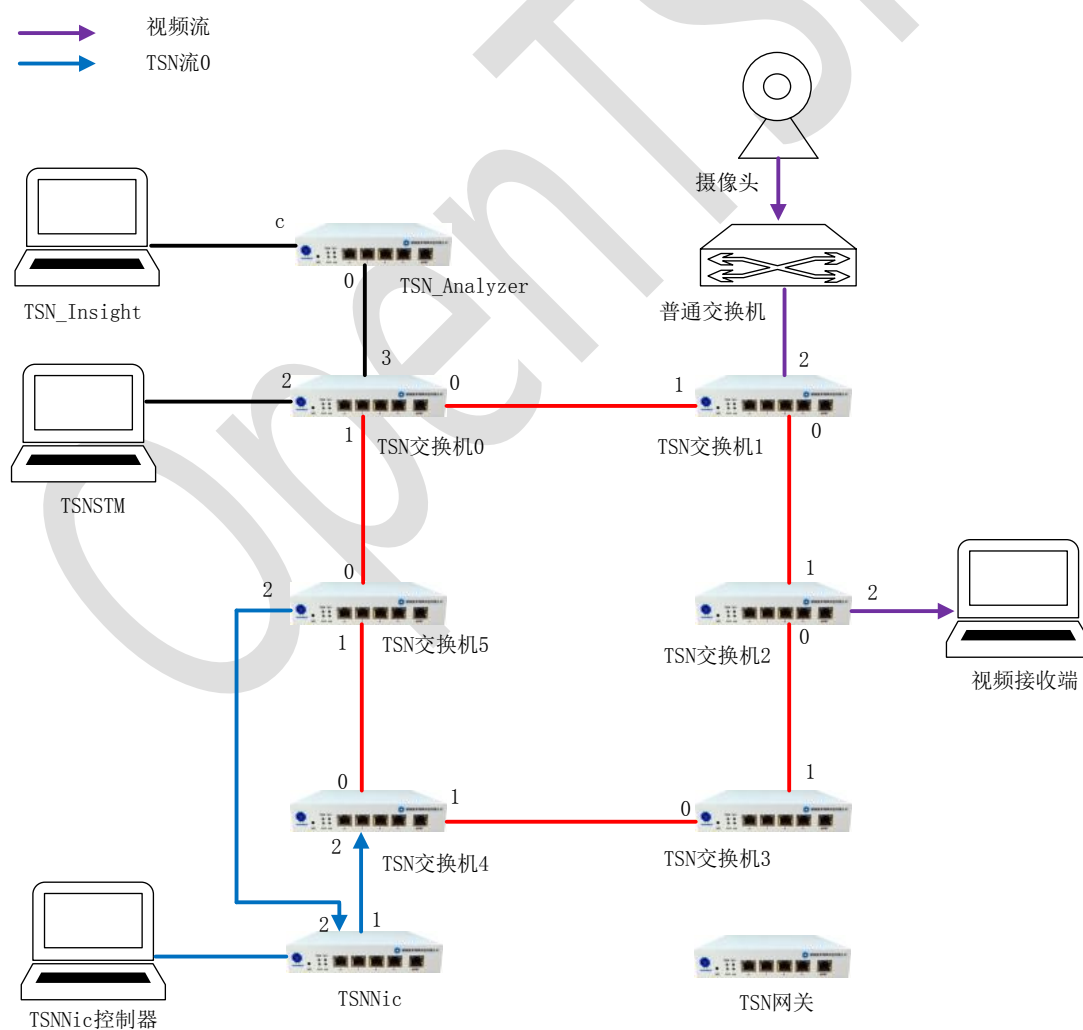


图 1-2 网络拓扑图

2、核心服务层基础模块

核心服务层中各个基础模块和基础应用之间的关系如下图所示。状态监测模块依赖拓扑管理模块、南向 I/O 通信库模块和北向 I/O 通信库模块。状态监测模块从拓扑管理模块中获取拓扑信息，依赖南向 I/O 通信库模块获取 PTP 报文，然后生成状态信息经北向 I/O 通信库模块发送到用户应用层。资源调度模块依赖资源预约模块和北向 I/O 通信库模块，从资源预约模块获取流特征，然后把流特征通过北向 I/O 通信库模块发送到用户应用层。

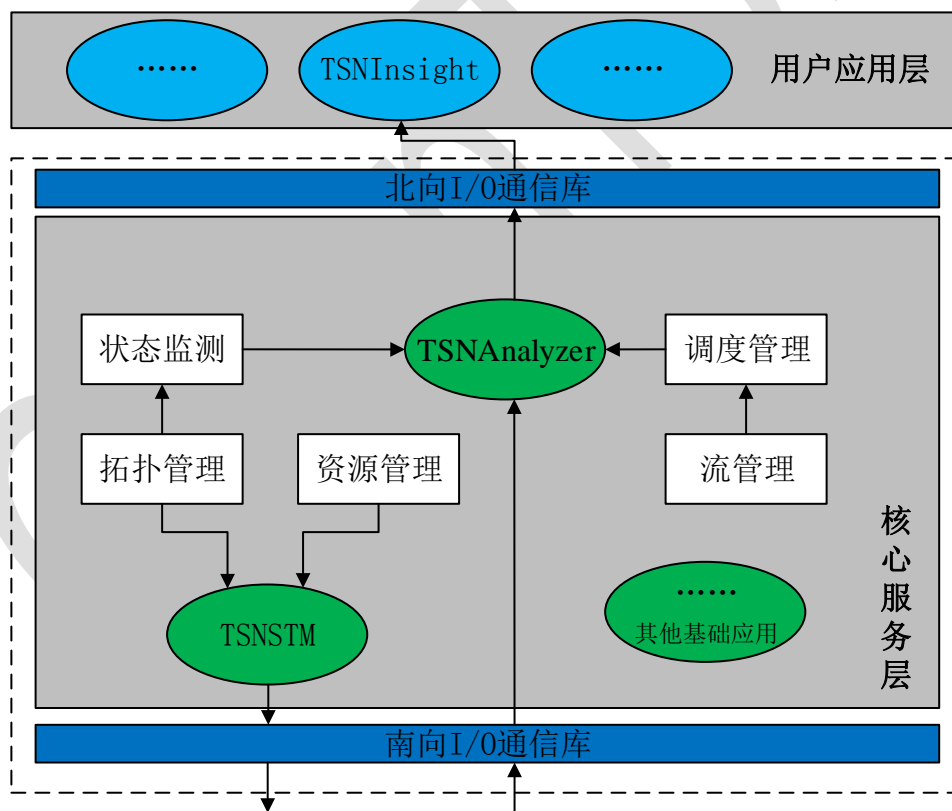


图 2-1 模块之间的关系

2.1 拓扑管理模块

2.1.1 功能描述

拓扑管理模块主要提供对整个 TSN 网络中交换机与交换机，交换机和主机之间连接关系进行管理的 API。通过采用双向链表的方式来保存交换机和端系统属性以及连接关系，以静态读取文本的方式进行拓扑初始化。提供的 API 有拓扑初始化、交换机节点的插入、主机 MAC 地址修改、获取交换机节点属性等功能。

拓扑管理模块的数据结构也分为环形和星型模式，星型模式比环形模式增加了转发表和 TAP 口的内容。

2.2 资源管理模块

2.2.1 功能描述

资源管理是对所有 TSN 交换机设备的可调度资源的管理。TSN 交换机设备的可调度资源主要包括带宽资源、CQF 资源和当前配置信息等。而对资源的管理操作主要包括资源初始化、获取设备资源、更新设备资源、更新配置信息等。关于设备的可调度资源和对资源的管理操作详细的描述如下：

(1) 设备资源：包括带宽资源，CQF 资源和当前配置信息。

a) 带宽资源：带宽资源主要用于带宽预约型流量调度使用，但是需要考虑 TSN 流量也会占用带宽资源。

b) CQF 资源：用于时间敏感型流量，标识 CQF 队列的使用情况。

c) 配置信息：用来保存当前设备的配置信息。主要有方向 `direction`，令牌桶的速率 `tb_rate`，令牌桶的桶深 `tb_B`，还有主机的 `mac` 地址，如果是星型拓扑，则需要配置的还有转发表。

(2) 资源管理：主要包括资源初始化，获取设备资源，更新设备资源，更新配置信息。

a) 资源初始化：在开始时对每一个设备的资源进行初始化，主要是对总带宽和总的 CQF 队列长度进行赋值。

b) 获取设备资源：获取设备当前的资源的使用情况。

c) 更新设备资源：提供更新设备资源的接口，可以通过带宽或者 CQF 改变量来更新当前设备的资源状态。

d) 更新配置信息：提供更新配置信息的接口，可以根据配置信息的改变来更新当前的配置信息。

资源管理模块提供的 API 主要包含设备资源初始化、带宽资源查询和更新、CQF 资源查询和更新、当前配置信息更新等功能。

在环形拓扑中，每个 TSN 交换节点中有 4 个队列，其中前两个个队列为 CQF 队列，用于存储 TSN 流；第 3 个队列为带宽预约队列，用于存储带宽预约流；第 4 个队列为 Best-effort 队列，用于存储 Best-effort 流量。可调度的资源包括带宽资源和 CQF 资源

在星型拓扑中，每个交换节点按照端口进行划分，每个端口都有四个队列，前两个个队列为 CQF 队列，第 3 个队列为带宽预约队列，第 4 个队列为 Best-effort 队列。

2.3 流管理模块

2.3.1 功能描述

流管理模块主要功能是读取资源预约流的特征信息进行保存，其主要包括流特征。

通过文本静态读取流特征信息，然后存储在数据结构中，其他模块通过访问该数据结构获取流特征信息，方便对流量进行调度。其中流特征信息包含两种流（时间敏感流和带宽预约流），在时间敏感流中包含 mac 地址、优先级、报文大小和延迟等特征，带宽预约流主要包含的特征为预约带宽的大小。

流特征模块主要描述时间敏感流和带宽预约流的特征，预约管理模块主要是通过读取文档获取用户对流的要求，初始化当前的资源预约表。

2.4 调度管理模块

2.4.1 功能描述

调度管理模块的主要功能是根据流资源预约表信息进行流量的调度和资源分配。其主要包括路径计算，流量排序，时隙调度，带宽调度和资源配置五个模块。

调度管理模块根据资源管理获取设备的初始资源，根据资源预约获取流特征信息。工作流程是首先根据流特征信息计算出每条流应该经过的最佳路径，生成路径信息，然后根据流的特征对流进行排序，

并根据 CQF 队列的长度对时间敏感流量进行调度，对带宽预约的流量进行调度，最后对交换节点进行配置和对全局资源进行更新。

(1) 路径计算模块：根据拓扑和流特征信息计算每条流经过的交换机路径。

(2) 流量排序模块：根据路径、报文数量、带宽等条件对流量进行排序。

(3) 时隙调度模块：根据每个时间槽可用的 CQF 队列长度对 TSN 单播流进行调度。

(4) 带宽调度模块：根据可用的链路带宽对带宽预约流进行调度。

(5) 资源配置模块：包括两方面功能：(1) 根据资源调度分配结果对交换机和端系统进行配置；(2) 对全局资源数据进行更新。

目前仅仅实现通过调度管理模块获取流特征，然后把流特征通过北向 I/O 通信库发送到 TSNInsight 应用中。

2.5 状态管理模块

2.5.1 功能描述

状态管理主要功能是检测网络状态，由状态表和状态管理模块组成。

网络状态包括各个交换节点的时间同步状态和队列信息。通过对接收到的 PTP 报文进行分析来得到同步状态，在每一轮接收到从时钟发送的报文后都会与该轮上报的主时钟进行比较，从而判断出

这一轮从时钟与主时钟的时间偏差，计算出网络的同步状态。队列信息则提供每个交换节点的该时刻的队列状态。

状态管理模块的工作流程是接收南向 I/O 通信库发送的 PTP 报文，然后再根据拓扑管理模块进行解析对应的交换机上报的 PTP 报文，最后生成状态信息通过南向 I/O 通信库发送到用户应用。

(1) 状态表：通过单链表维护每一轮主机和交换机上报的 PTP 报文中时钟同步信息和节点状态。

(2) 状态管理模块：主要提供 PTP 报文处理和状态表遍历功能。

a) PTP 报文处理：PTP 报文中包含每个 TSN 交换机和 TSN 端系统传输报文累积的透明时钟。包含该 PTP 报文的 FAST 报文头部包含接收时间戳。通过将接收时间戳减去累计的透明时钟可以得到每个 TSN 节点报文的发送时间。此外，如果收到节点上报的 PTP 报文，则说明该节点的状态为运行状态。

b) 状态表遍历功能：定时对状态表中每个节点进行遍历，每一轮的 PTP 报文接收超时，则将该轮同步结果上报给控制器。每一轮在接收到与交换机个数相等的数量的报文后进行上报。

3、通信库

通信库包含南向通信 I/O 库和北向通信 I/O 库，其中南向通信 I/O 库用于基础应用与数据平面之间的通信，北向通信 I/O 库用于基础应用与用户之间的通信。

3.1 南向通信 I/O 库

3.1.1 功能描述

南向通信 I/O 库主要提供 TSN 控制器和交换机通信功能，包括南向协议报文相关 API 和报文 I/O 操作相关 API 两部分。

南向通信报文 I/O 操作支持两种通信方式，一种是使用 libnet 进行发包 libpcap 进行收包，另一种方式是使用 FAST lib 库进行接收和发送报文。因此，用户可根据自身需要决定应用程序的运行环境是在 PC 端还是 FAST 平台上。目前 TSNSTM 模块使用的 libnet 构造和发送报文，运行环境需要在 PC 端，而 TSNAnalyzer 模块使用 FAST lib 库进行接收报文，运行环境需要在 FAST 平台上。

南向协议报文使用扩展的 PTP 报文来承载 TSN 控制器对 TSN 交换机下发的配置信息以及收集的网络状态信息。

南向通信 I/O 库模块提供的 API 主要有 PTP 报文的构造、接收，配置端系统 MAC 地址、交换机传输方向、令牌桶参数等功能。

目前分为两种拓扑形式，环形拓扑和星型拓扑，两种形式的配置内容不相同，星型中有 TAP 功能开关和转发表。

3.2 北向通信 I/O 库

3.2.1 功能描述

北向 I/O 通信库主要提供核心服务层与用户应用层之间通信功能，从而把控制层的数据呈现给用户。包括北向协议报文相关 API 和北向

报文 I/O 操作相关 API。

北向报文 I/O 操作的实现机制是基于 TCP socket 通信方式，提供的 API 有 socket 初始化、报文发送等功能。

北向协议报文通过使用自定义的北向报文结构体与 JSON 封装北向报文数据的方式，来承载网络状态时钟同步信息、流特征信息、交换机队列信息等。提供的 API 有北向报文的构造等功能。

4、示例应用

针对于控制器的各个模块，可以设计出多个应用，目前开发的基础应用模块有 TSNSTM 和 TSNAnalyzer 两个基础应用模块和 TSNInsight 顶层应用模块。

4.1 TSNSTM 设计

4.1.1 整体架构

目前设计的 TSNSTM 只有对网络进行配置的功能，因此使用的模块有全局资源管理、拓扑管理、南向通信 IO 库三个模块。

TSNSTM 根据拓扑管理模块分析出网络中的拓扑，可以给网络中的交换机分配与该交换机相连的主机 mac 地址，进行流量转发。并根据全局资源管理得到全局的资源状态，从而对网络中的交换机配置资源信息。所有的配置功能都需要通过南向通信 IO 发送到网络中，目前使用的南向通信 IO 是采用 libnet 进行发包。各个模块的具体功能见详细模块设计。

TSNSTM 的结构图如下提所示，其中绿色部分为 TSNSTM 使用到的模块。

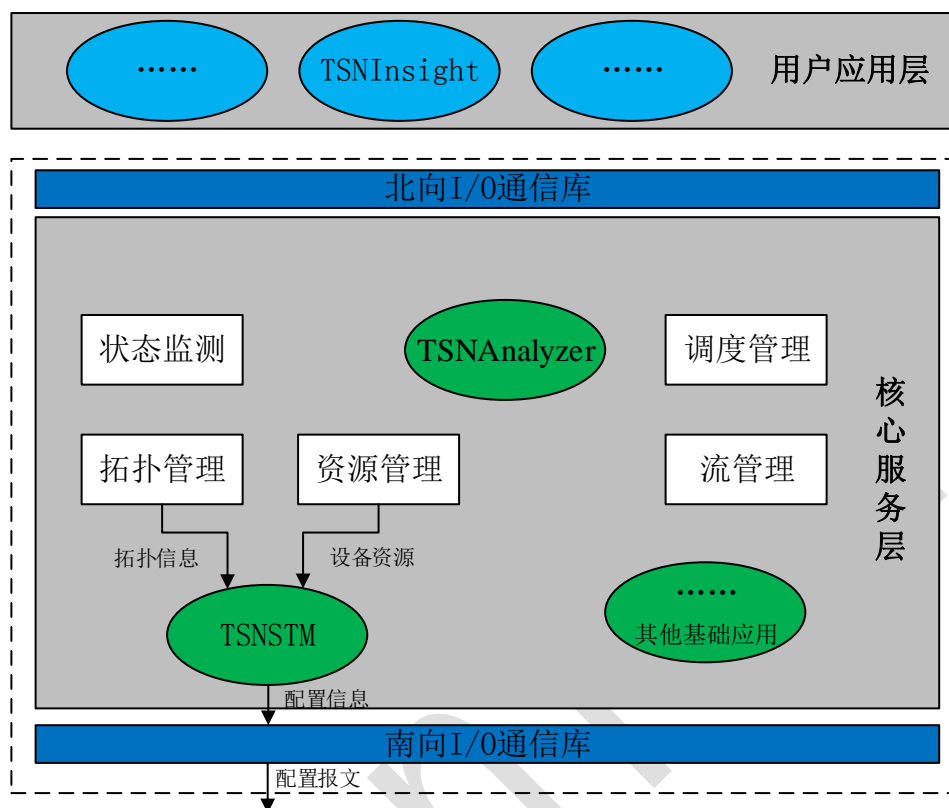


图 4-1 TSNSTM 结构图

目前 TSNSTM 主要使用的模块是资源管理、拓扑管理和南向 I/O 通信库模块，其中在资源管理模块获取设备资源的状态，例如获取设备的传输方向、令牌桶的桶深、产生令牌的速率和时间槽的大小等，在拓扑管理获取网络中的拓扑信息，以便对所有的交换节点进行配置，然后根据资源调度分配模块生成配置信息，通过南向 I/O 通信库模块生成 PTP 的报文,主要填充配置域部分的内容，再通过 LIBnet 发送到网络中。

4.2 TSNAnalyzer 设计

4.2.1 整体架构

TSNAnalyzer 是流量分析器，主要作用对流量进行分析，包括时间同步信息的流量和其他流量。目前主要实现的功能是对时间同步的流量进行分析，交换节点在同一时间向 TSNAnalyzer 发送报文，通过在 TSNAnalyzer 中接收到报文的时间戳来计算他们到达的时间，然后再根据透明时钟分析出各个从时钟与主时钟的时间偏差来的到同步状态，目前的同步状态可以达到 50ns 以下。

整体框图如下图所示

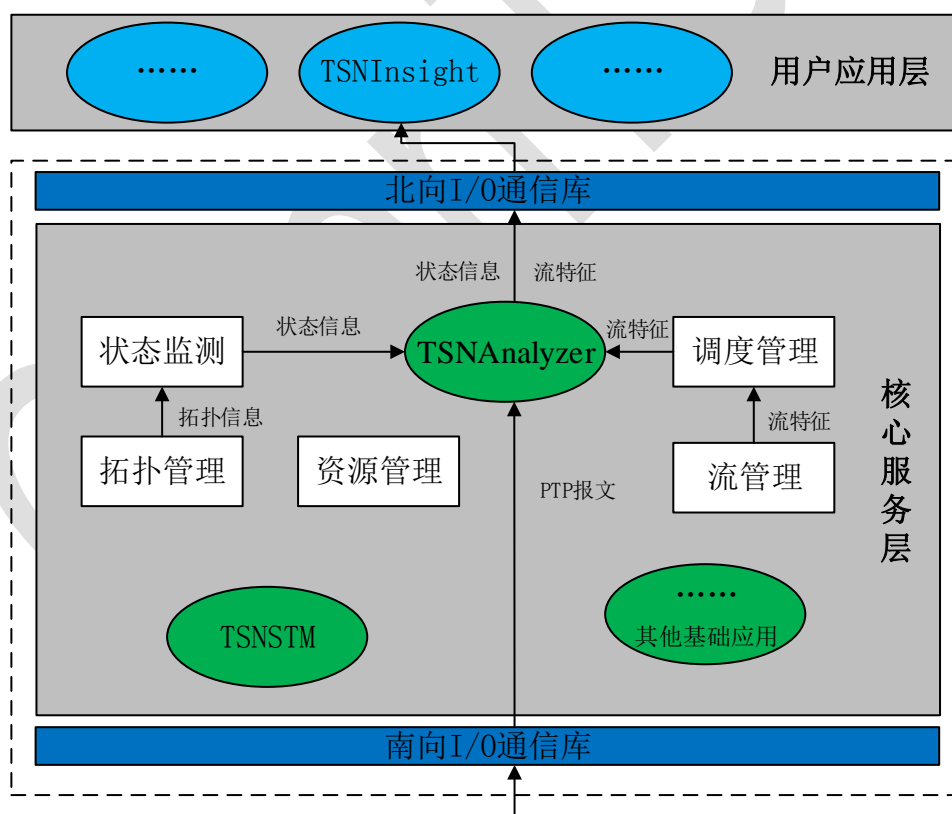


图 4-2 TSNAnalyzer 结构图

其中在 TSNAnalyzer 中，使用到的模块包含南向 I/O 通信库、资源调度分配、拓扑管理、资源管理、资源预约、状态监测和北向 I/O

通信库模块。其中通过南向 I/O 通信库在 FAST 中接收报文，并在接收线程 UA 的回调函数进行处理，分析是否为 PTP 报文或者其他报文，由状态监测模块对 PTP 报文进行解析，再根据拓扑管理模块分析出网络的状态，然后通过北向 I/O 通信库发送到可视化应用中。资源调度分配模块可以从资源预约模块读取流特征，在资源管理模块得到当前的资源状态，然后对分配调度（目前该部分还没有实现，只在资源调度分配模块获取流特征信息，然后把流特征信息通过北向 I/O 通信库发送到可视化应用中）。

4.3 TSNInsight 设计

TSNInsight 是对同步状态进行展示，即是用户应用层的部分，通过控制部分的北向通信 I/O 库与该部分进行通信，获取网络状态（同步状态和队列信息）。

TSNInsight 的主要功能是展示，根据 socket 接收到的交换节点的状态信息，通过使用 Qt，在界面上进行展示，主要展示的信息有静态展示，包含拓扑信息和流特征信息，动态展示包括全局时钟同步和交换机队列信息。

4.3.1 整体架构

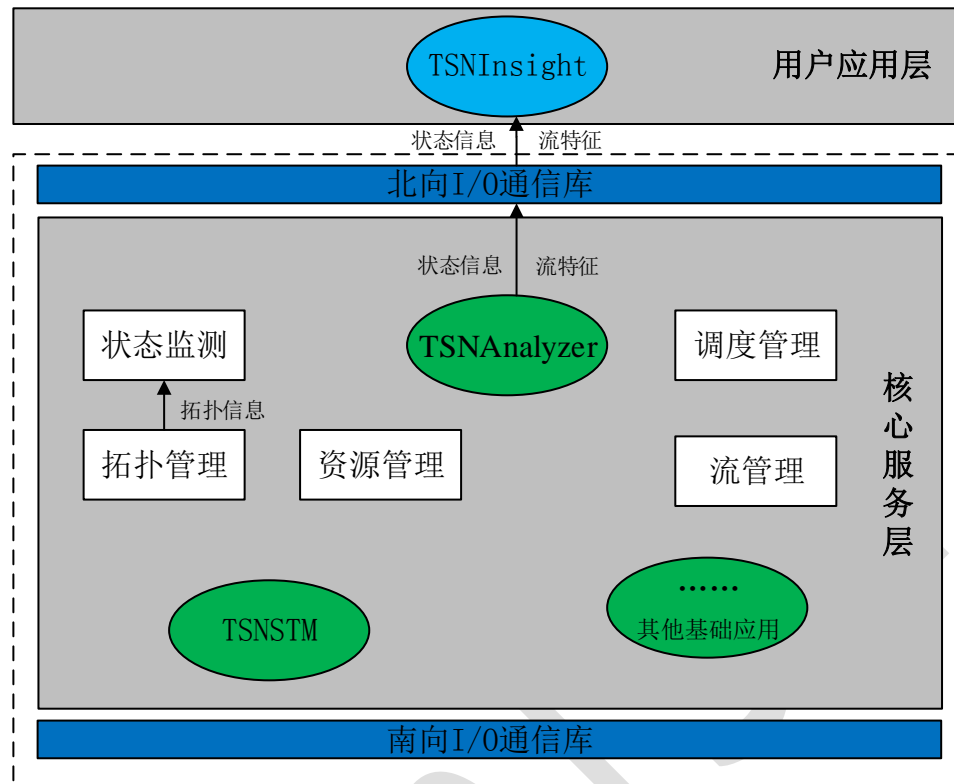


图 4-3 TSNInsight 结构图

TSNInsight 整体架构如上图所示，其中 TSNInsight 主要是通过北向 I/O 通信库获取基础应用层中 TSNAnalyzer 的信息，包括网络状态信息和流特征信息，其中网络状态有时钟同步状态和队列信息，能够体现出网络中是否同步，队列使用情况的信息。

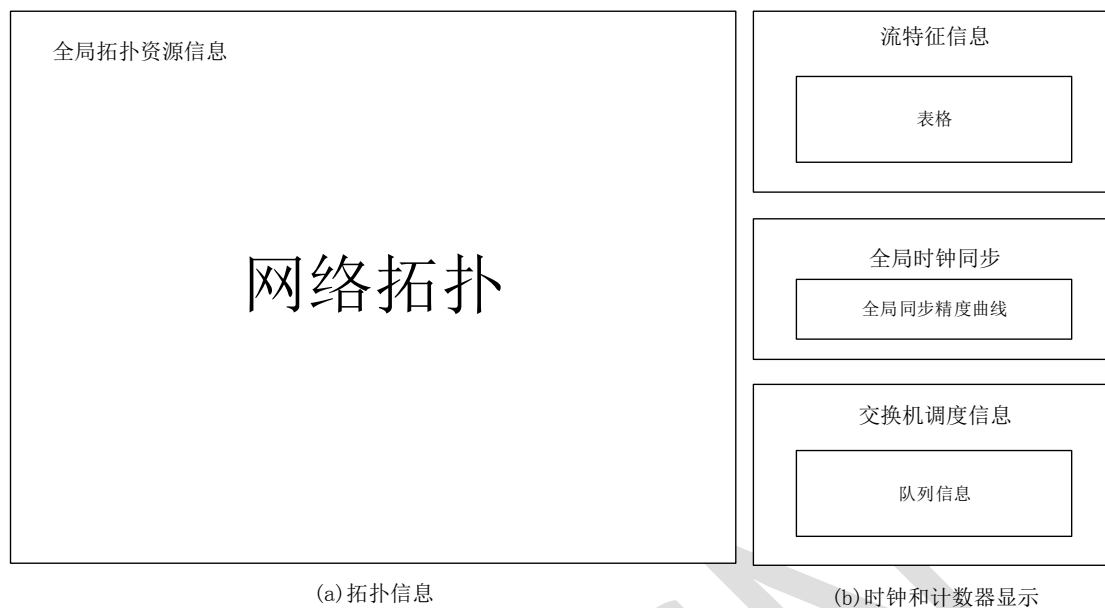


图 4-4 展示效果

图 a 中显示拓扑信息，展示交换机的 sw_id，与交换机连接主机的类型，资源信息包括 CQF 队列，带宽资源等，同时展示全局时间同步的偏差和各个交换节点与主时钟的偏差。

图 b 中显示流特征信息，包括 TSN 流和带宽预约流的流特征，分别展示了源 MAC，目的 MAC 等，其中 TSN 流还包括时间周期，最大延迟等，带宽预约流包括占用带宽的资源；全局时钟同步展示了各个交换节点与主时钟的差别，使用动态折线的形式进行展示，并且也展示了最大与主时钟的偏差的折线；交换机调度信息展示了各个队列的使用情况，环形中每个交换节点只有四个队列，星型中是按照端口进行划分，每个端口都有四个队列。