面向服务器的香山处理器多核解决方案

丁昊楠[1] 张林隽[2] 陈熙[1] 蔡洛姗[1] 王凯帆[1] 袁宇翀[1]
朱昱[2] 马久跃[2] 张睿思[1] 马月骁[1] 郑楚育[2]
[1]中国科学院计算技术研究所 [2]北京开源芯片研究院

2024 年 8 月 22 日

目录

- 背景
- 开源生态
  - 验证方法
  - 硬件 IP
- 解决方案
  - 过去（TileLink）
  - 未来（AMBA CHI）
- 总结

目录

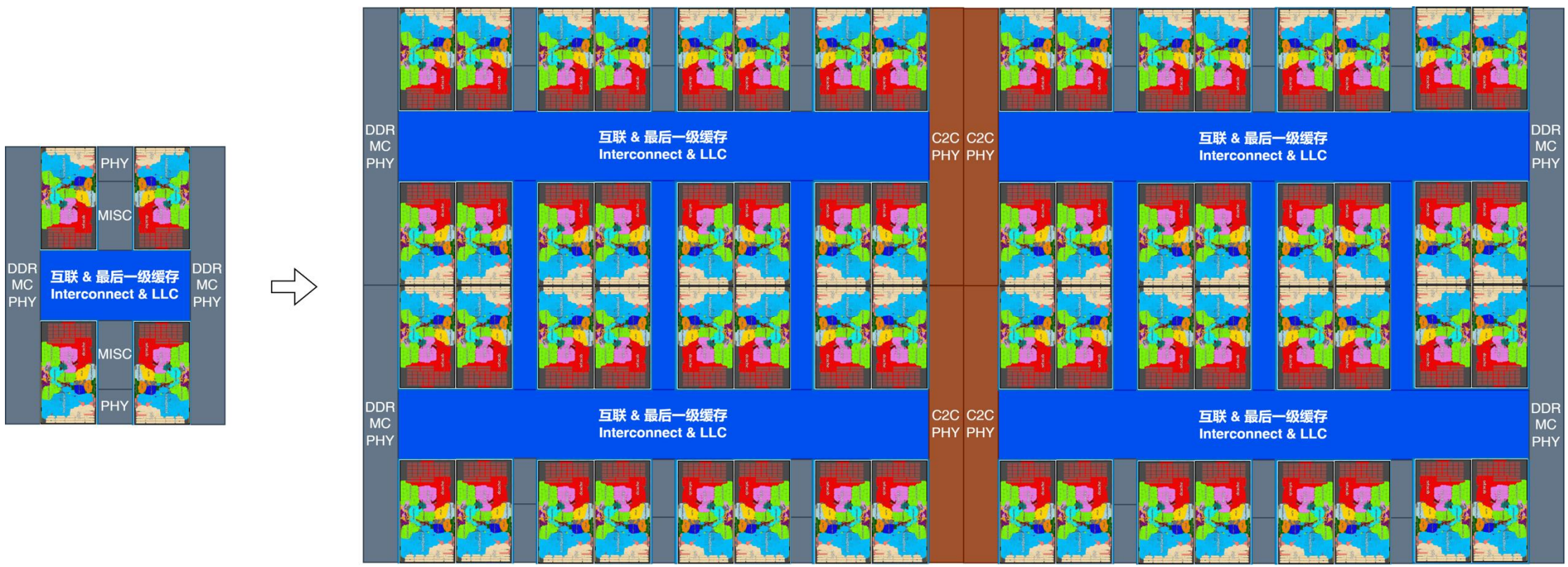
背景

→ 服务器平台的处理器需要更多核心

- **并行计算需求增加**
  - 多任务处理
  - 高并发需求
- **虚拟化和云计算**
  - 计算资源分配
  - 弹性规模扩展
- **数据密集型应用兴起**
  - 大数据分析
  - 机器学习和人工智能
- **多线程编程的普及**
  - 单核性能进步放缓
  - 开发者的转变
- **能源效率与热管理**
  - 功耗控制
  - 相对较低的频率
- **技术进步**
  - 制造工艺的提升
  - 总线架构优化

背景

→ 扩展更多核心的关键在于互联总线



TileLink vs AMBA CHI

特性	TileLink	AMBA CHI
一致性状态	类 MESI	MOESI
流控	**Ready-valid**	**Credit**
拓扑感知	**无**	**有**
QoS	**无**	**有**
内存序支持	**未定义**	**有(支持多种)**
电源、复位、时钟管理	**无**	**有**
Cache-to-cache Direct Transfer	未定义	**有**
Cache-to-memory Direct Transfer	未定义	**有**
CMO	无	**有**
Exclusive	无	**有**
Atomic	有	**有**

支持复杂总线拓扑（如 Mesh）的必要标准化定义

支持**复杂总线性能优化**的必要附加功能定义

支持**一致性操作性能优化**的必要附加功能定义

Take away

小结 ①

TileLink 总线不能满足服务器平台的产品化需求

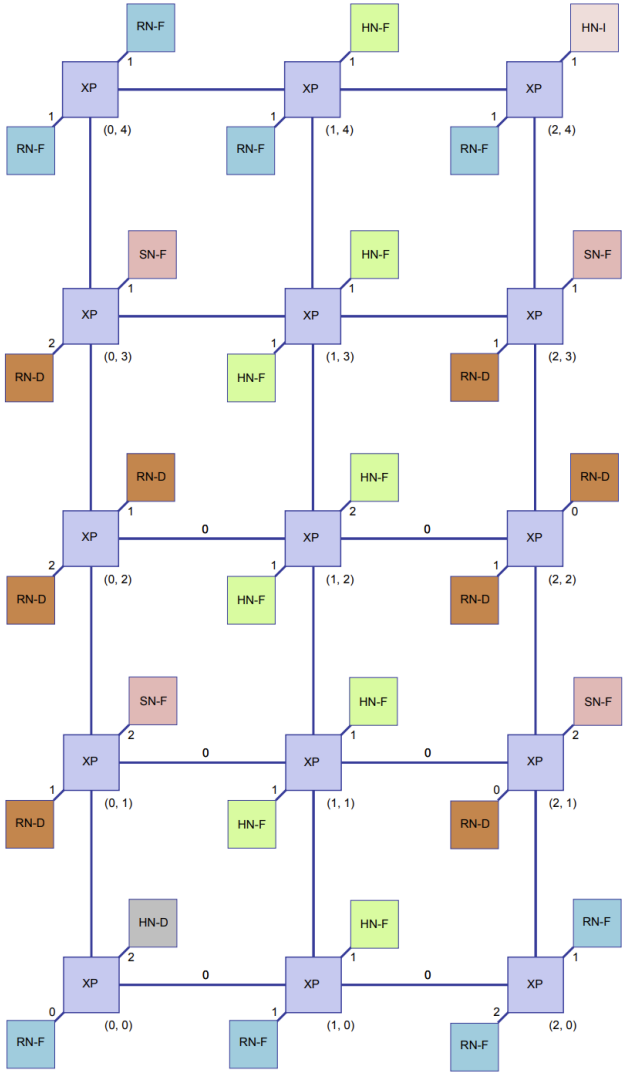
目录

开源互联总线生态——工具

- **开发 = 设计 + 测试**
- **计算平台复杂度不断提高**
  - 多核、多级缓存、异构
  - 高性能计算终将拥抱 NoC
- **缓存系统的复杂度不断攀升**
  - 高并发度的硬件实现
  - 拥有最多 Corner Case 的部件之一

→ 基础设施工具直接决定开发效率

- **缓存一致性验证的重要性和复杂度不断提高**



ARM CMN600 3x5 Mesh NoC 示例

开源互联总线生态——工具

需求	TileLink	AMBA CHI (过去)
协议层抽象	有（TL-Test）	无
事务级抽象	有（TL-Test）	无
一致性检查	有（TL-Test）	无
测试环境构造	有（TL-Test）	无
可约束随机测试	有（TL-Test）	无
快速测例构造	有（TL-Test）	无
调试工具	ChiselDB + TLLog	无

工程化验证的基石

加快设计、测试迭代的方法

→ AMBA CHI 的开源工具生态基本空白

- 在我们决定迁移到 AMBA CHI 的时刻

开源互联总线生态——IP

- **互联 = IP + Floorplan**
- **互联结构复杂度不断提高**
  - 各种总线组件的约束、摆放
  - 时钟域、电源域管理
- **SoC 的需求目标多样化**
  - 服务器平台
  - 桌面平台
  - 社区开发、学术研究

→ IP 本身也构成基础设施的一部分

开源互联总线生态——IP

需求	TileLink	AMBA CHI (过去)
开箱即用	有（rocket-chip）	无
总线组件 IP	有（rocket-chip）	无
外设组件 IP	有（rocket-chip）	无
小型互联 IP	有（rocket-chip）	无
大型互联 IP	无	无

开源可用性

产品级高性能实现

→ AMBA CHI 的开源 IP 生态基本空白

- 在我们决定迁移到 AMBA CHI 的时刻

Take away

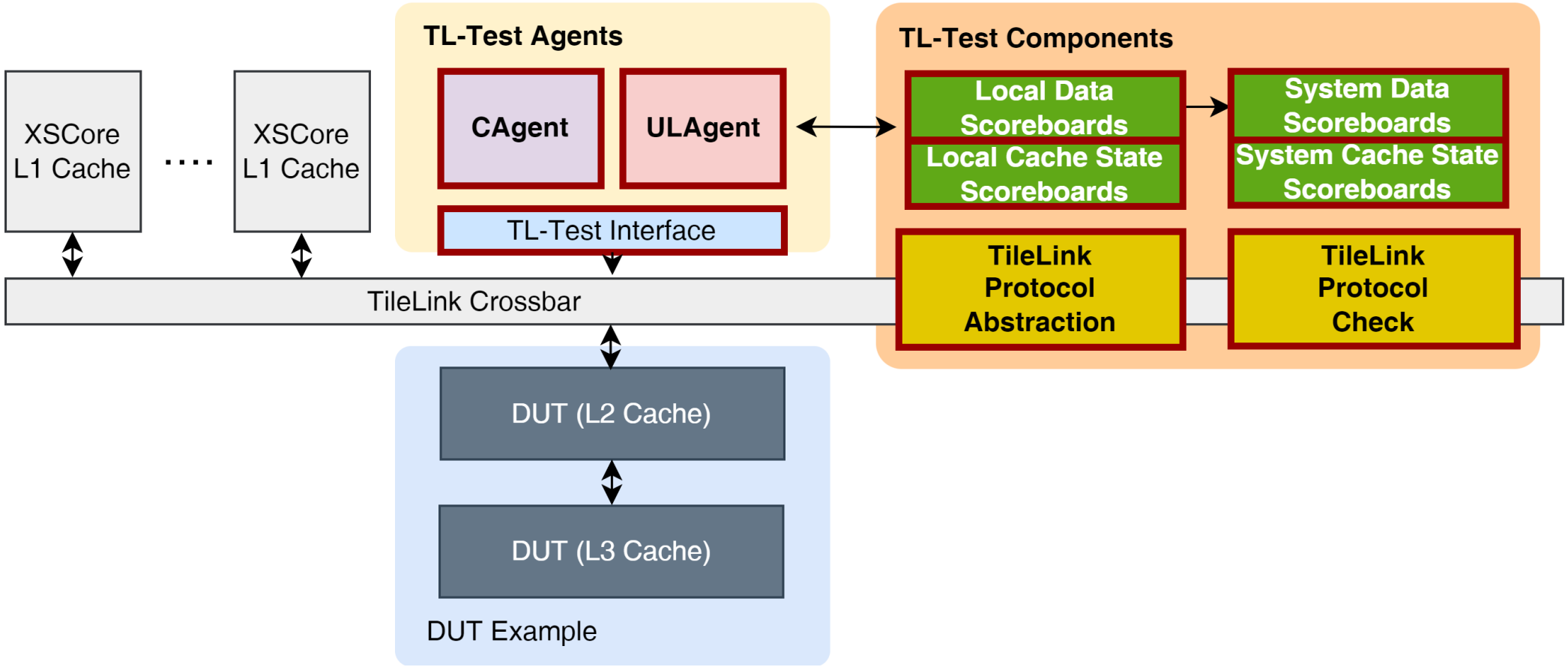
小结 ②

高扩展、高性能总线开源生态几乎是一片空白

目录

- 背景
- 开源生态
  - 验证方法
  - 硬件 IP
- **解决方案**
  - **过去（TileLink）**
  - 未来（AMBA CHI）
- 总结

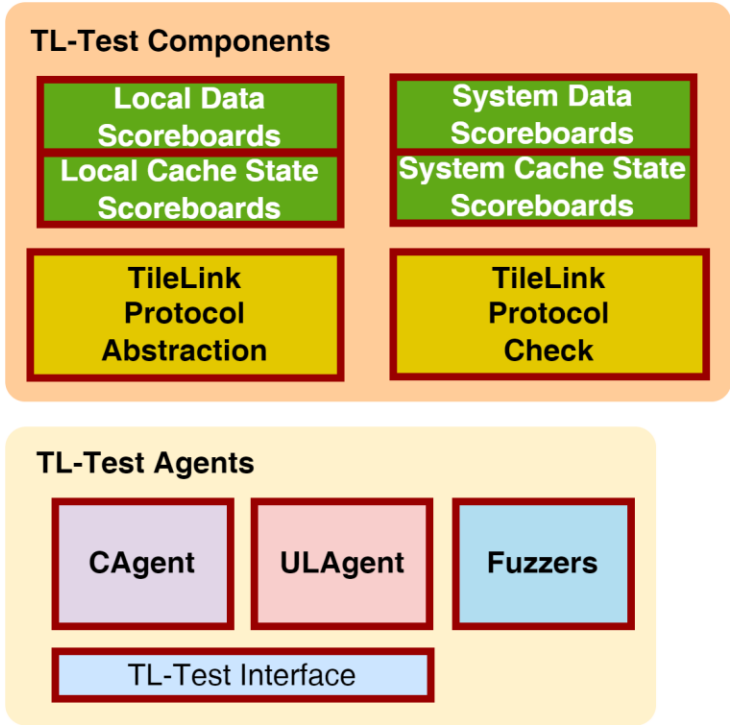
TL-Test: 基于 TileLink 的多功能缓存验证框架



- 基于 TileLink 总线抽象出的一整套验证、调试基础设施

验证基础设施

- **TileLink Protocol Check**
  - 覆盖协议层抽象、事务级抽象
  - 对协议正确性的检查
- **Local & System Scoreboard**
  - 缓存一致性检查
- **CAgent & ULAgent**
  - 快速测例构造
- **Fuzzers**
  - 可约束随机测试
  - 在验证前期快速提高测试覆盖率



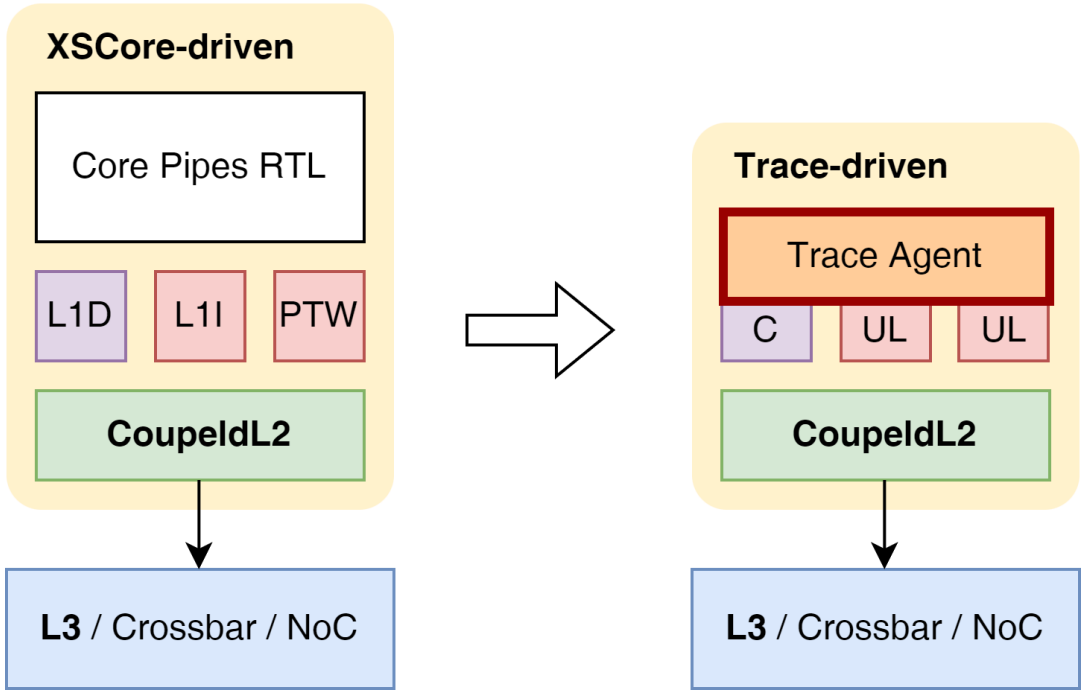
调试辅助工具

- **TLLog: 持久化总线事务**
  - 基于 ChiselDB（Chisel 下基于 SQLite3 的数据持久化）
  - 将运行过程中的总线事务记录到数据库中
  - 离线错误检索
  - 离线性能分析

时间戳	监控器名称	通道	Opcode	权限升降	状态转换信息	SourceID	SinkID	地址	数据			
116854134	L2_L1I_0	A	AcquireBlock	Grow	NtoB	1	0	803d3680	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000
116854146	L2_L1I_0	D	GrantData	Cap	toT	1	16	803d3680	fa843783f9043903	06090063f8f43c23	f8f4382300093783	378300093023c3bd
116854147	L2_L1I_0	D	GrantData	Cap	toT	1	16	803d3680	03e32e07bb030089	f0ef8526c881f49b	bb0300893783bbdf	855a010925832e07
123191840	L2_L1I_0	C	ReleaseData	Shrink	TtoN	0	0	803d3680	fa843783f9043903	06090063f8f43c23	f8f4382300093783	378300093023c3bd
123191841	L2_L1I_0	B	Probe	Cap	toN	0	0	803d3680	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000
123191841	L2_L1I_0	C	ReleaseData	Shrink	TtoN	0	0	803d3680	03e32e07bb030089	f0ef8526c881f49b	bb0300893783bbdf	855a010925832e07
123191848	L2_L1I_0	D	ReleaseAck	Cap	toT	0	31	803d3680	0000000020fab05b	0000000020fab45b	0000000020fab85b	0000000020fabc5b
123191851	L3_L2_0	C	ReleaseData	Shrink	TtoN	31	0	803d3680	fa843783f9043903	06090063f8f43c23	f8f4382300093783	378300093023c3bd
123191852	L3_L2_0	C	ReleaseData	Shrink	TtoN	31	0	803d3680	03e32e07bb030089	f0ef8526c881f49b	bb0300893783bbdf	855a010925832e07
123191862	L3_L2_0	D	ReleaseAck	Cap	toT	31	16	803d3680	86a6f7043583dcd5	f0ef856a865a8762	3583b7654481e17f	865a86a68762f704
123191863	L2_L1I_0	C	ProbeAck	Shrink	TtoN	0	0	803d3680	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000
123191878	L3_L2_0	C	Release	Report	NtoN	30	0	803d3680	5597bf494981aa09	8522cc2585930000	f84ef15dda0f00ef	00194703b775e84a

调试辅助工具

- **TLTrace: 基于 trace 的激励生成**
  - 将处理器核的**访存 trace 转换为测试激励**
  - 将 DUT 从处理器核中剥离
  - 快速复现功能性问题
  - 快速调试性能问题



TileLink 解决方案

需求	TileLink
协议层抽象	TL-Test (TileLink Protocol Check)
事务级抽象	TL-Test (TileLink Protocol Check)
一致性检查	TL-Test (Local & System Scoreboard)
测试环境构造	TL-Test
可约束随机测试	TL-Test (Fuzzers)
快速测例构造	TL-Test (CAgent & ULAgent)
调试工具	ChiselDB + TLLog + TLTrace

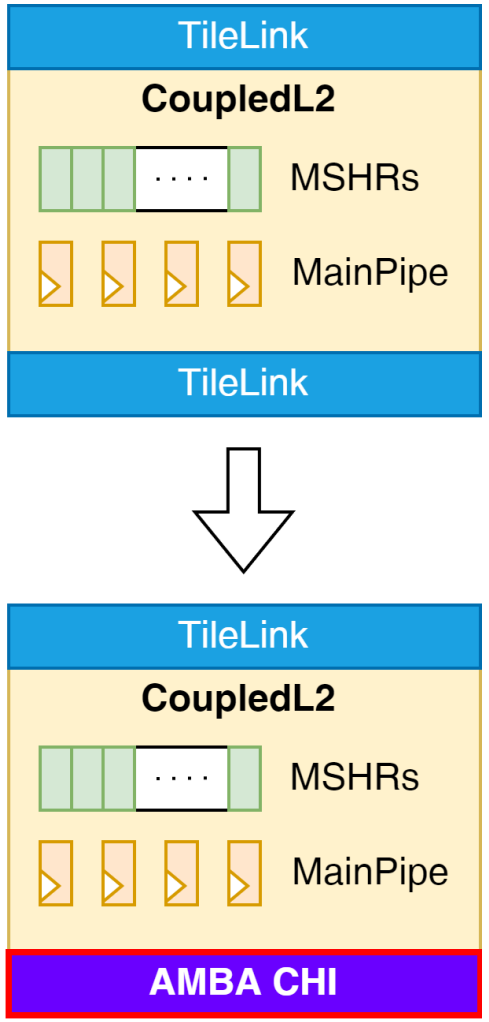
→ 已完成对 TileLink 总线开源生态的需求覆盖

目录

- 背景
- 开源生态
  - 验证方法
  - 硬件 IP
- **解决方案**
  - 过去（TileLink）
  - **未来（AMBA CHI）**
- 总结

硬件架构演进

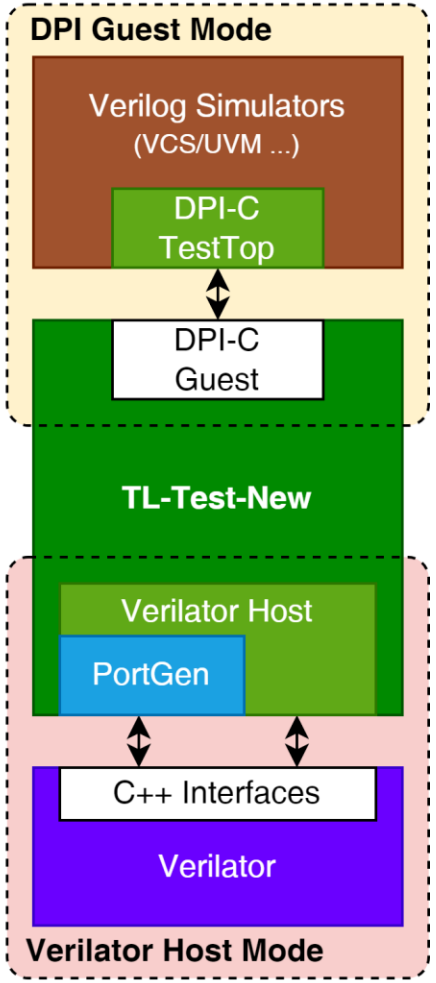
- **TileLink to CHI**
  - 一、二级缓存间仍然使用 TileLink 连接
  - 二级缓存向下使用 CHI
  - **在二级缓存(CoupledL2) 内完成协议转换**
  - **测试激励界面依然是 TileLink**
- **实践考虑**
  - 前期**完全没有** CHI 基础设施支持
  - 项目进度限制
    - 很难重写整个缓存子系统
    - 很难同时维护 TileLink 与 CHI 版本的二级缓存



软件工具演进

- **TL-Test-new: 支持商业仿真环境的 TL-Test**
  - **初期没有可用的开源 CHI 下游**
    - 目前 AMBA CHI 仅有商业 RTL IP 和 VIP
  - **保证原有工作流可用**
    - 完善 ChiselDB 对商业仿真器的支持
  - **同时支持开源、商业仿真环境**
    - 一套代码，部署到多个不同定位的工作流
  - 更好的随机激励生成器（Fuzzer）

→ 开发流程永远需要基础设施的支持



软件工具演进

- **CHIron: 开源 AMBA CHI 基础设施**
  - 用 C/C++ 描述 CHI 协议标准
  - **同时支持** CHI Issue B 与 Issue E.b
  - **协议层抽象** **已完成**
  - **事务层抽象** 开发中
  - 与 ChiselDB 兼容的 CHILog
    - TileLink 环境下 TLLog 的同定位实现
  - **CLog**: ChiselDB 的替代文件格式
    - 多种文件格式定义: CLog.T, CLog.B, CLog.Bz ...
    - 传递 CHI 配置信息
      - 简化不同工作组间的信息传递
    - **相较于 ChiselDB (SQLite3) 达到 ~10x 性能提升 与 ~0.4x 空间占用**

```
1   $clog.segment.param.begin
2
3   $chi.issue E.b $$
4
5   $chi.width.nodeid       7 $$
6   $chi.width.addr         48 $$
7   $chi.width.rsvdc.req    4 $$
8   $chi.width.rsvdc.dat    4 $$
9   $chi.width.data         256 $$
10  $chi.enable.datacheck   0
11  $chi.enable.poison      0
12  $chi.enable.mpam        0
13
14  $clog.segment.param.end
15
16  $clog.segment.topo.begin
17
18  $comment  | Node Id  | Node Type  |
19  $chi.topo   4          RNF          $$
20
21  $clog.segment.topo.end
22
23  $comment  | Time     | Node Id   | Channel   | Flit bits
24  $chi.log    0          4           TXREQ       abcdef0123456789 $end
25  $chi.log    4          4           RXRSP       0123456789abcdef $end
```

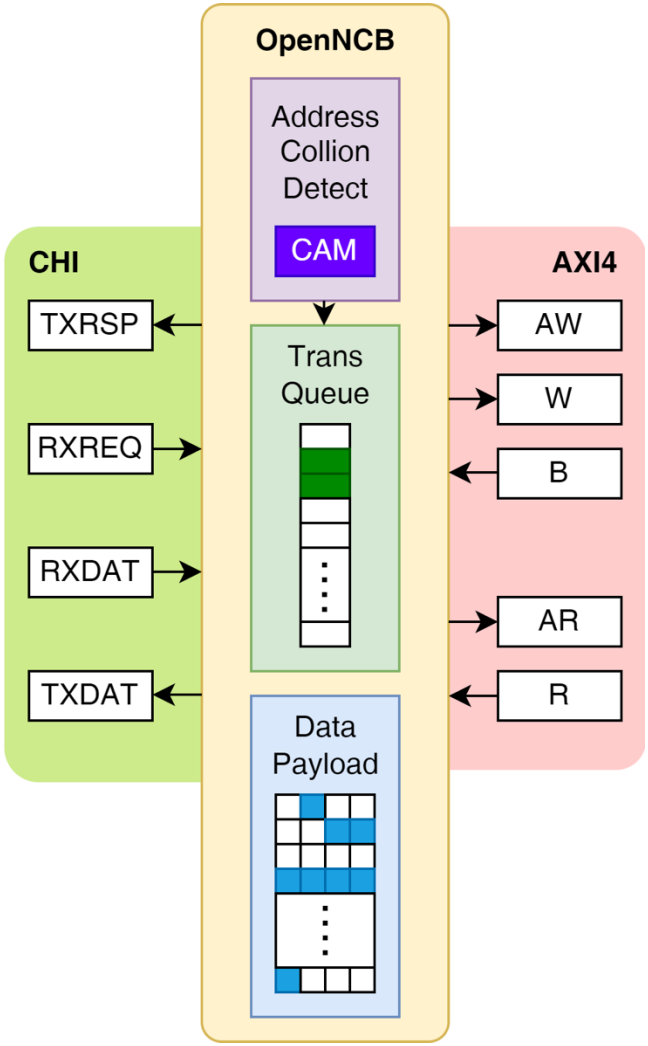
软件工具演进

需求	TileLink	AMBA CHI (过去)	AMBA CHI (未来)
协议层抽象	有 (TL-Test)	无	**有** (CHIron)
链路层抽象	不需要	无	**有** (CHIron)
事务级抽象	有 (TL-Test)	无	**部分** (CHIron)
一致性检查	有 (TL-Test)	无	**部分**,非原生 (TL-Test-new)
测试环境构造	有 (TL-Test)	无	**部分**,非原生 (TL-Test-new, CHIron)
可约束随机测试	有 (TL-Test)	无	**部分**,非原生 (TL-Test-new)
快速测例构造	有 (TL-Test)	无	**部分**,非原生 (TL-Test-new)
调试工具	ChiselDB + TLLog	无	**CLog.T** + **CHILog** (CHIron)

→ 基础设施仍需要更多努力

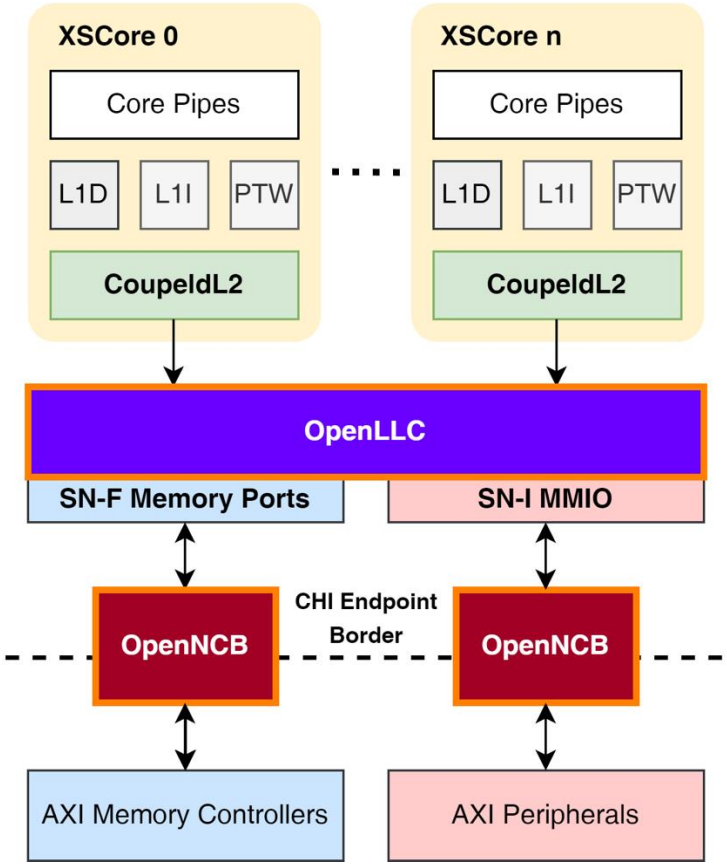
开源 CHI SoC IP 实践

- **OpenNCB: 开源高性能 CHI to AXI4 协议桥**
  - 到 AXI4 的非一致性桥接
    - 主要桥接内存设备
  - Credit-controlled Zero Retry
  - **支持参数化配置 outstanding 深度**
  - 支持参数化配置总线数据宽度
    - CHI： 128, 256, or 512 bits
    - AXI： 32, 64, 128, 256 or 512 bits
  - 可配置的**事务乱序**
    - 全乱序、部分乱序、不乱序
  - 保证可观测性顺序的**事务提前返回**



开源 CHI SoC IP 实践

- **OpenLLC: 开源高性能 CHI HN-F 实现**
  - 向上为 RN-F 端口，向下为 SN-F 端口
  - 支持部分必要的 CHI Issue B 事务
  - 支持 CMO 请求
  - **基于目录的 MESI 一致性协议（w/ Snoop Filter）**
  - **支持多种缓存包含策略**
    - 单核为 exclusive，多核为 non-inclusive
  - **高并发度设计与非阻塞主流水线架构**
    - 多 slices 并行，同缓存 set 内请求并行
    - 支持部分事务数据 bypass



→ OpenLLC 与 OpenNCB 组成 CHI 最小互联系统 IP

开源 CHI SoC IP 实践

需求	TileLink	AMBA CHI (过去)	AMBA CHI (未来)
开箱即用	有（rocket-chip）	无	**OpenLLC** + **OpenNCB** + AXI
总线组件 IP	有（rocket-chip）	无	**OpenLLC**, **OpenNCB**
外设组件 IP	有（rocket-chip）	无	**OpenNCB** + AXI
小型互联 IP	有（rocket-chip）	无	**OpenLLC** + **OpenNCB**
大型互联 IP	无	无	OpenNoC

→ 为开源社区提供更多选择

目录

- 背景
- 开源生态
  - 验证方法
  - 硬件 IP
- 解决方案
  - 过去（TileLink）
  - 未来（AMBA CHI）
- **总结**

总结

- TileLink 无法满足服务器平台产品化需求
- 开源高性能互联总线生态仍有很大空白
- **尝试构建 CHI 的开源生态解决方案**

项目名称	分类	定位	状态
TL-Test-new	工具	过渡期的兼容性保障基础设施	已完成
CHIron	工具	CHI 的开源基础设施	设计、开发中
OpenNCB	SoC IP	开源高性能 CHI SN-F to AXI 实现	开发中
OpenLLC	SoC IP	开源高性能 CHI HN-F 实现	开发中

  - 我们依然在向 CHI 迁移的过渡期
  - 开源生态仍需要大家一起来努力

注： 1. 以上所有开源项目都以同名仓库的形式存在于 https://github.com/OpenXiangShan
2. 部分未开源就绪的项目会在将来迁移到以上位置

敬请批评指正！