十万卡AI集群思考

ZOMI

思考

- **构建十万卡集群是一项复杂的系统工程：**
  - 不仅意味着算力指数级增长，还涉及复杂的技术和运营挑战
  - 需要解决高效能计算、高能耗管理、高密度机房设计、高稳定性训练等一系列问题
  - 最终能否将算力有效释放，还取决于算法、软件架构的优化与调度能力

目录

01

十万集群都训练什么

十万集群目标

- **谁在建?**
  - 多个大型 AI 实验室（OpenAI/微软、xAI、Meta）竞相建立 >10 万卡 AI 集群。
- **有什么用?**
  - AI 下一步利用海量多模态数据，训练超大规模参数大模型。

- 虽然目前还没有团队完成，但该领域竞争已经十分激烈。

算力对比

- 通过对标 GPT-4 训练来了解 10 万卡 AI 集群能提供多少算力：
  - OpenAI ~2 万块 A100 上对 GPT-4 持续训练 90-100 天（ FP16 2.15x1025 FLOPs），集群峰值吞吐为 6.28 BF16 ExaFLOP/s；
  - 如果使用 10 万卡 H100 集群，峰值吞吐可以飙升至 198/FP8 or 99/FP16 ExaFLOP/s。与 2 万卡 A100 集群相比，AI 集群训练算力可提升 31.5 倍；

GPT4 遥遥领先

- GPT4 在 2023.6 发布，OpenAI GPT-4 完成一次训练约三个月时间，使用 25k NVIDIA A100 GPU。如今已经十万卡 H100 集群，为什么到现在为止还没有出现超越 GPT4 的模型？

- 大模型训练不是堆算力就能解决
- 但是不堆算力绝对解决不了

单芯片能力

- 研发单 GPU 更多并行处理核心,努力提高运行频率。
- 通过优化高速缓存，减少 GPU 访存延迟，于是越来越多近存计算的新架构出现
- 优化浮点数表示格式，探索从 FP16 到 FP8/HiF8 浮点数表示格式，芯片引入新计算精度

超节点计算能力

- 提高万卡集群 NPU 卡间互联的网络利用率和模型利用率（MFU），实现通信时延减少，带宽能力跃升，支持更高频次、更大带宽和更低延迟通信特性：
  1. NPU 节点内集成类 Scale up 能力 Switch 芯片，优化卡间南向互联效率和规模，增强 TP/PP/SP 等数据传输能力
  2. 引入节点内 Switch 芯片，增强卡间 P2P 带宽，有效提升节点内网络传输效率，满足大模型互联和带宽的增长需求
  3. 对 NPU 卡间互联协议进行系统性优化和重构，以提升 All2All 下通信效率，如华为的灵渠总线架构协议、AMD、Google 组成的 UALink
  4. 重新设计 NPU 卡间数据报文格式、引入 CPO/NPO、提高和优化 SerDes 传输速率、优化网络拥塞控制/重传机制

网络计算能力

- DPU 上实现存储后端接口，基于 RDMA 网络功能连接块存储集群、对象存储集群、文件存储集群及文件存储集群
- 降低多机多卡间端到端通信时延，提升多机间端到端通信带宽，构建节点间数据交换的高速通道
- AI 计算场景流量特征是流数少、单流带宽大，端口级负载均衡技术或算网协同负载均衡技术能提提供姮好的吞吐

智能管控

- 统一对计算、存储、网络、光模块等进行资源、性能、告警、日志、拓扑等信息采集
- 提供资源管理、服务编排、监控、作业运维等功能，实现 AI 集群智能运维
- 环境健康检查、作业故障诊断、集群环境/资源管理、服务器管理以及监控分析等云化能力

02

功耗挑战

耗电

- 十万卡 AI 集群资本支出 >40 亿刀， AI 集群通过集中部署来利用芯片与芯片间高速网络能力，因此受到 IDC 功耗和电力不足严重限制。
- 一个 10 万卡 AI 集群需要 >150MW 功耗容量，并且每年耗费 1.59 TWh 电量，按 0.078 $/kw 标准费率来计算，每年电费高达 1.239 亿刀。

100k H100 GPU Cluster - Annual Electricity Costs		
Region	Tariff (USD/kWh)	Annual Cost $M
USA - Average	$0.083	$131.9
USA - North Dakota	$0.074	$117.6
USA - Utah	$0.068	$108.0
USA - Arizona	$0.078	$123.9
USA - ND Wind PPA	$0.033	$52.4
USA - Solar PPA (CAISO)	$0.033	$52.4

还是耗电

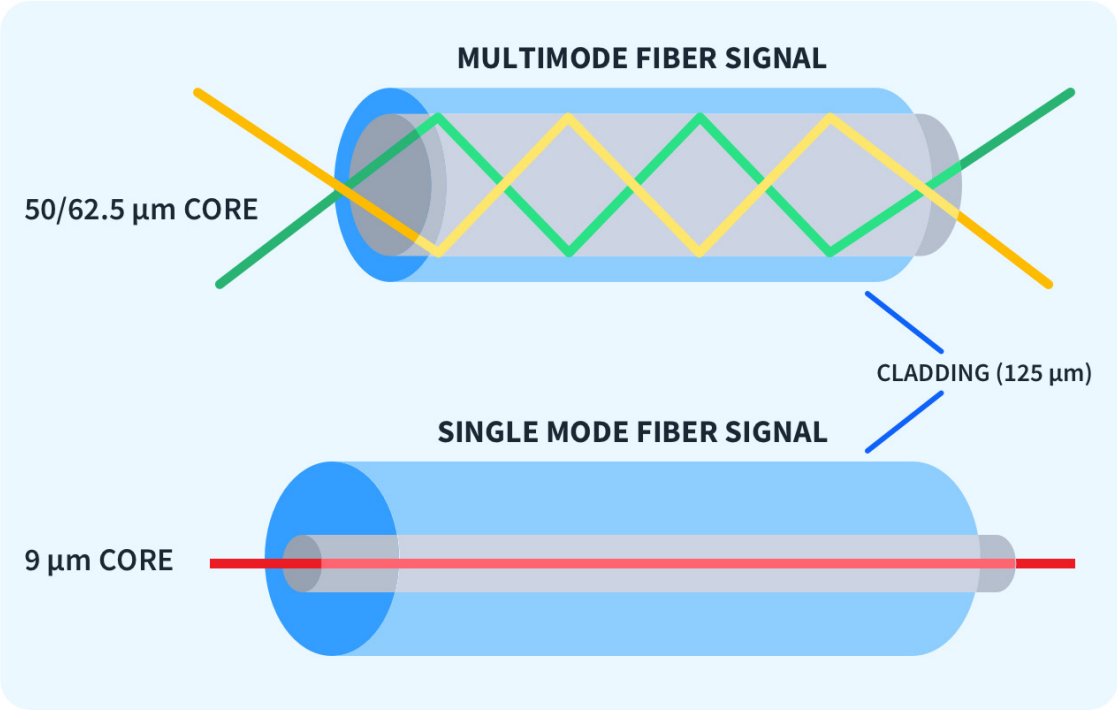
- 单卡 GPU 能耗为 700W，每个 H100 节点，CPU、网络接口卡（NIC）和电源装置（PSU）额外增加每 GPU 400~500W
- 节点外，AI 集群还需存储服务器、网络交换机、CPU 节点、光模块和其他设备，总能耗约占 IT 能耗 10%
- 建设 10 万卡 AI 集群时，通常指一片园区内部署，而不是单栋建筑内部署。xAI 将田纳西州孟菲斯旧工厂改造成智算中心

03

网络互联挑战

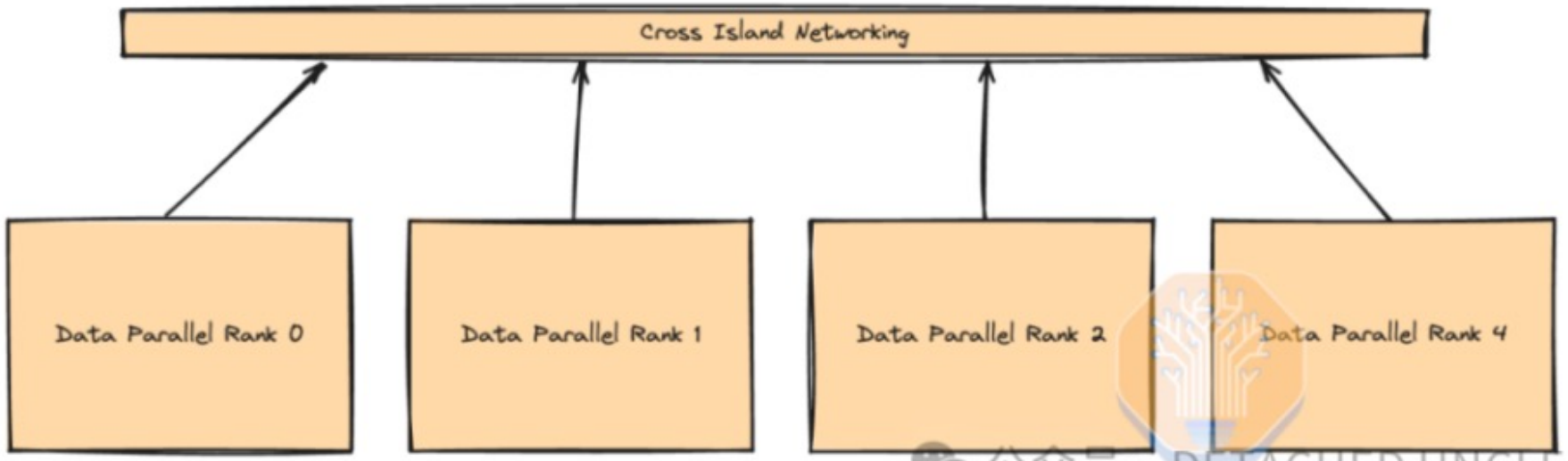
光模块传输距离

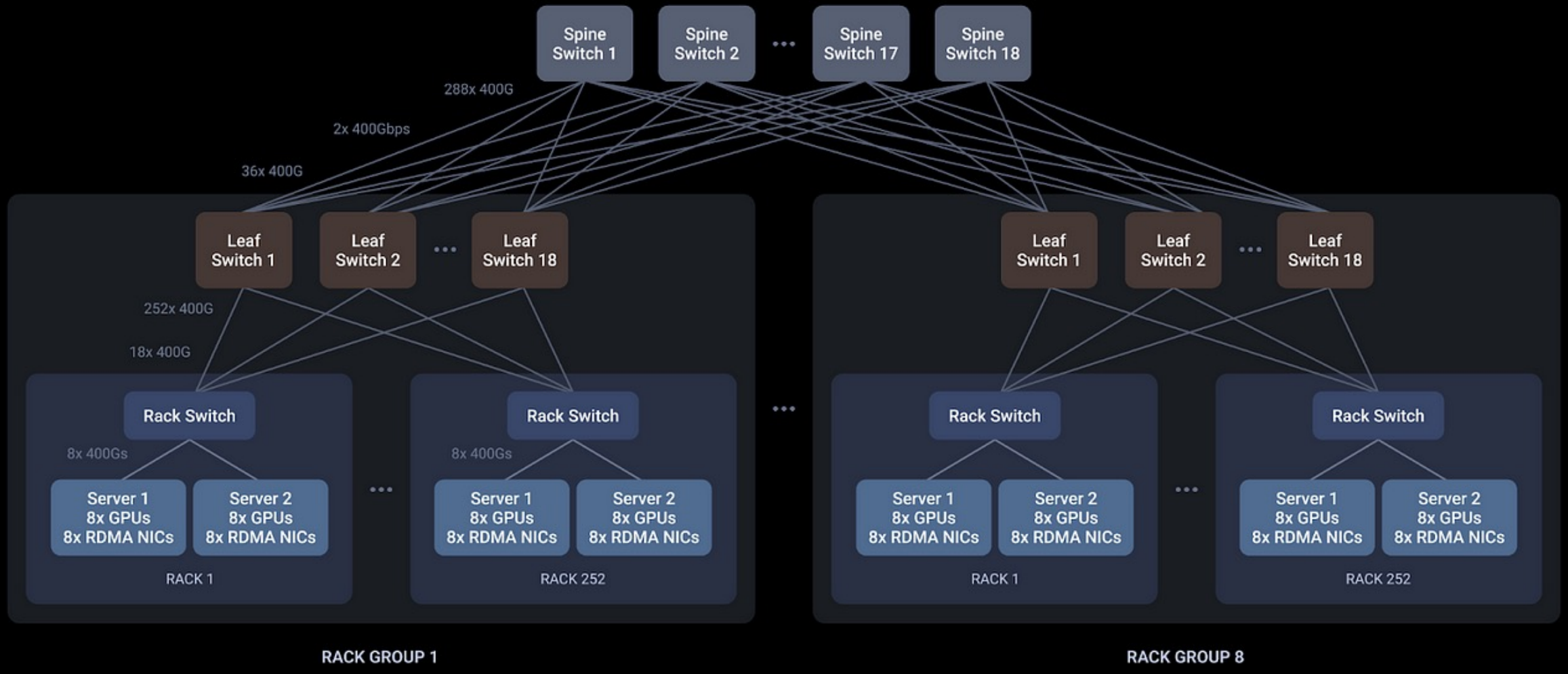
- AI 集群通过光模块互联，而光模块成本与覆盖范围成正比：
  - 多模 SR 和 AOC 光模块支持 ~50m 传输距离，长距离单模 DR 和 FR 光模块支持 500m ~ 2km 信号
  - DR 是 SR 多模光模块 ~2.5 倍成本，园区级相干光模块传输距离能 >2 千米，但价格 >10 倍以上



岛内和岛外互联的选择

- H100 小集群通常只使用多模光模块，通过一到两层交换机网络实现 400G 带宽卡间互联
- 一般每栋楼包含一个或多个计算节点，它们之间用铜缆和多模光模块进行连接
- 较长距离光模块来实现岛（island）际互连，计算岛内具备高速带宽，计算岛外带宽较低

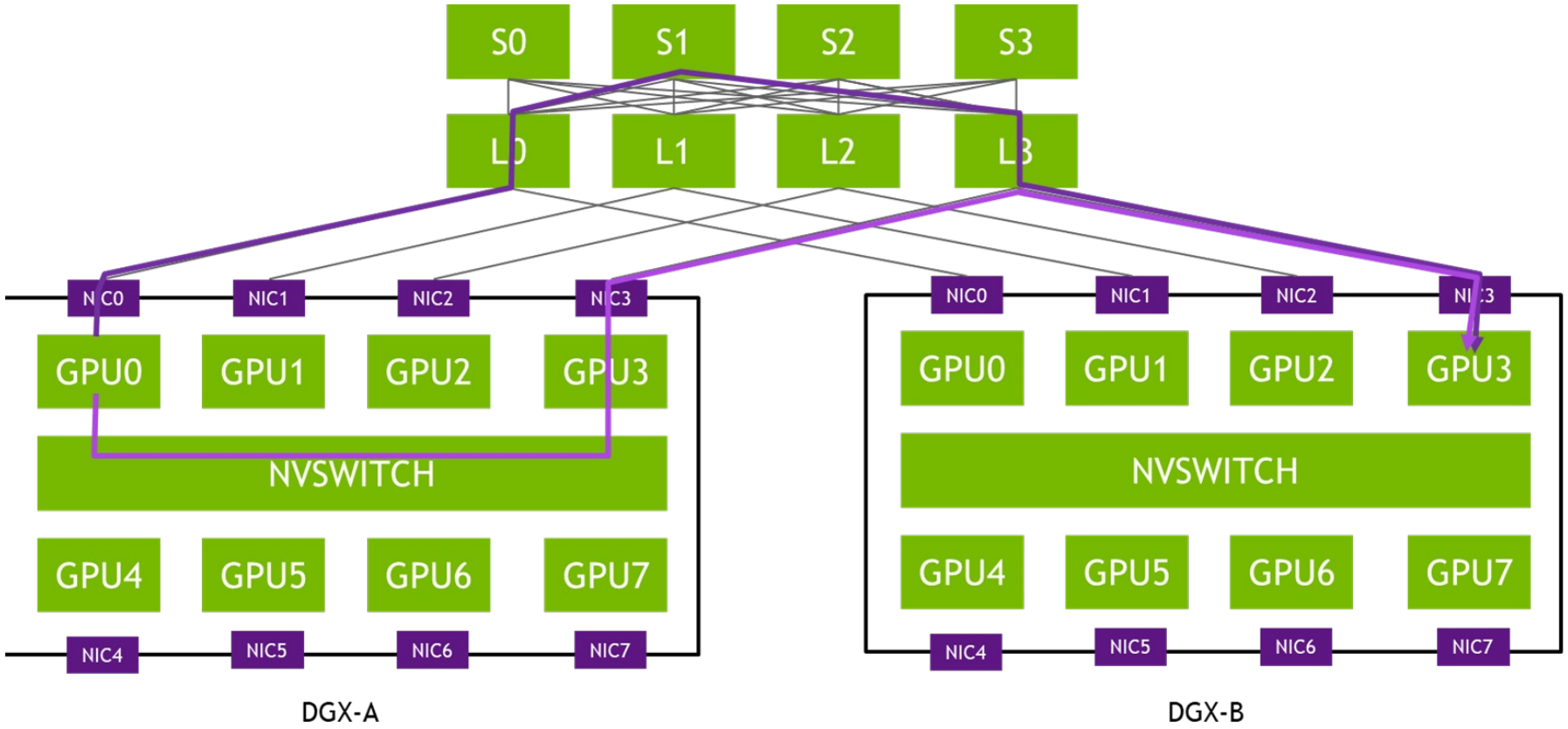




- Meta 3.2 万卡 GPU 集群中，设计 8 个全速带宽计算岛，计算岛之上一层交换机网络带宽过载比为7:1，岛际互联网络速度比岛内网速慢 7 倍。

轨道优化（Rail Optimized）& 中间机架（Middle of Rack）

- 为提高可维护性并增加铜缆网络（连接距离 <3m）和多模网络（连接距离 <50m），部分不采用轨道优化设计，转而采用中间机架设计



Question

- 中间机架（Middle of Rack）是什么意思?
- 轨道优化（Rail Optimized）又是什么意思?

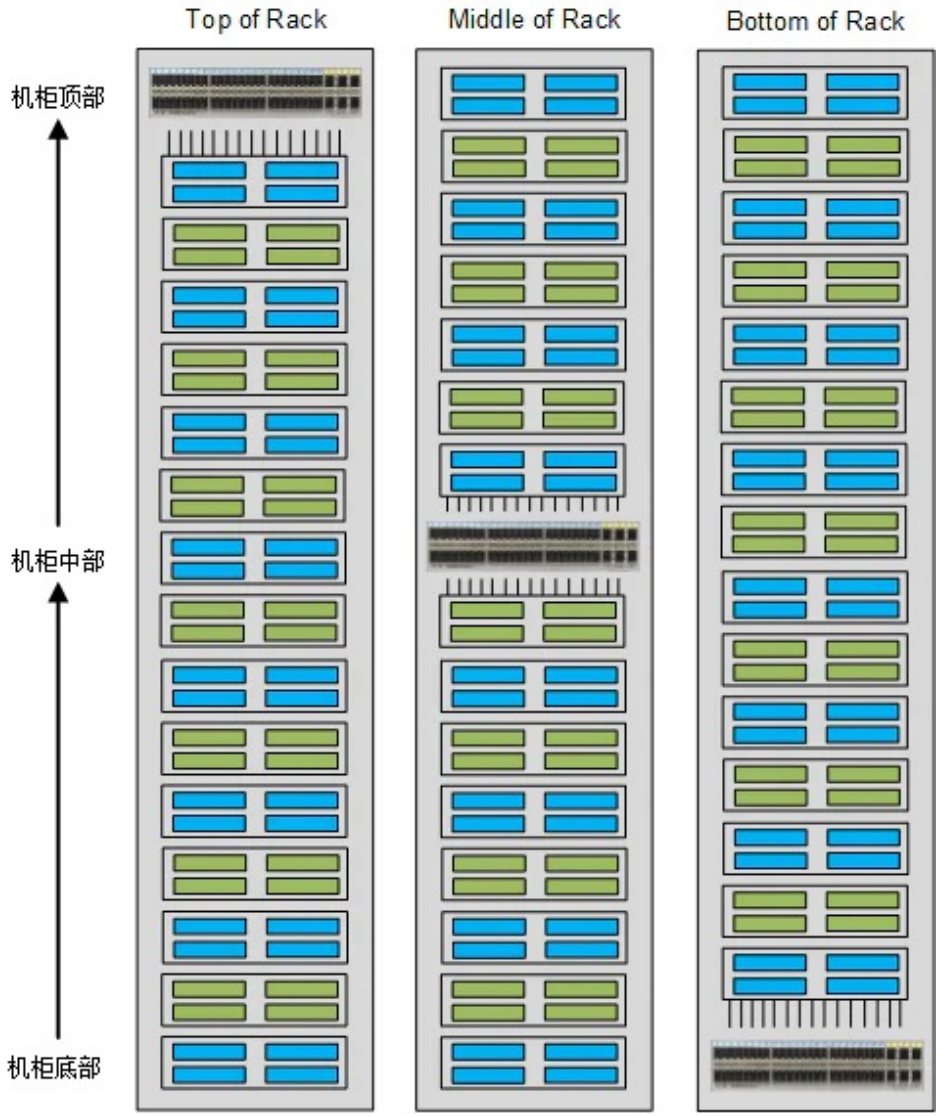
Question

- 轨道优化（Rail Optimized）又是什么意思?

https://space.bilibili.com/517221395/channel/collectiondetail?sid=3666664

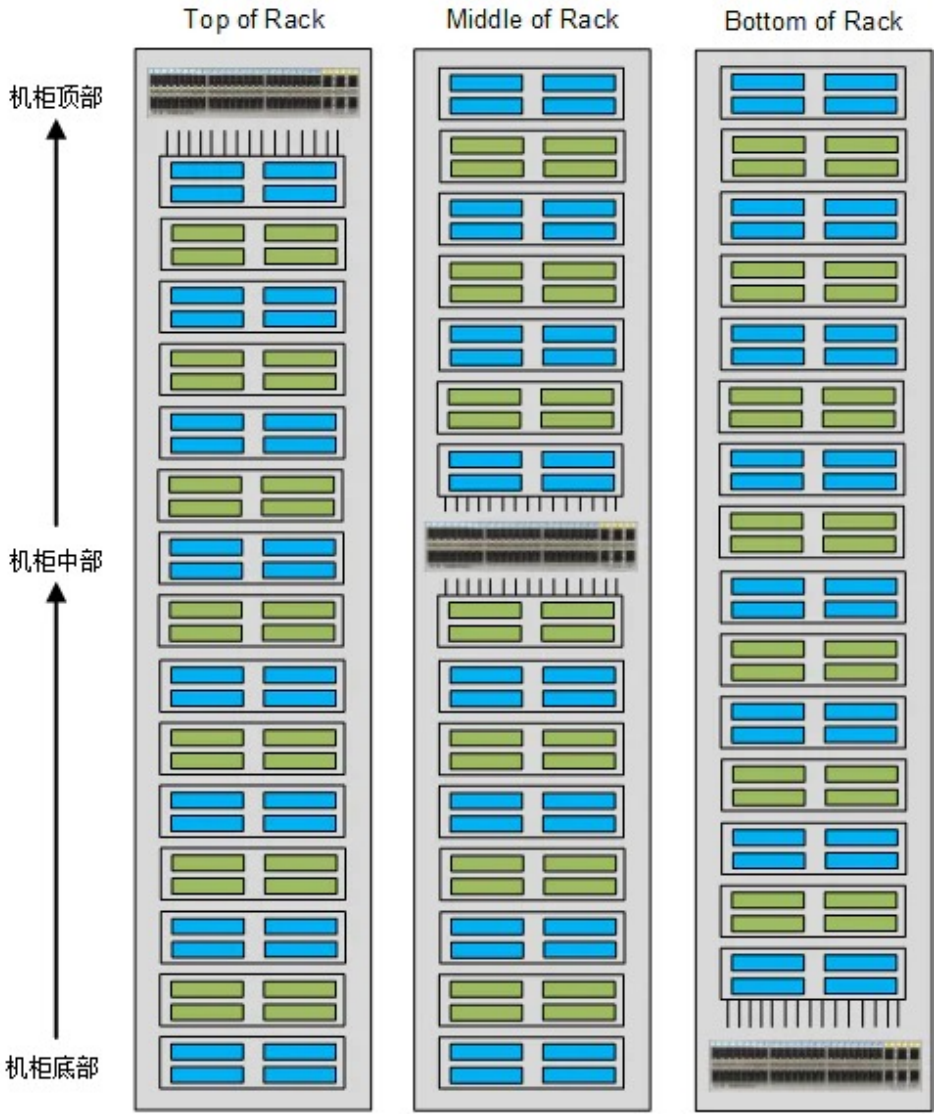
Middle of Rack

- 交换机在 IDC 机柜上部署位置，分为机柜顶部（Top of Rack）、机柜中部（Middle of Rack）& 机柜底部（Bottom of Rack）。
- 多轨优化让每台 H100 节点连接到 8 个不同叶交换机，每 GPU 只需 1 个交换跃点（switch hop）就能与另外 GPU 通信。



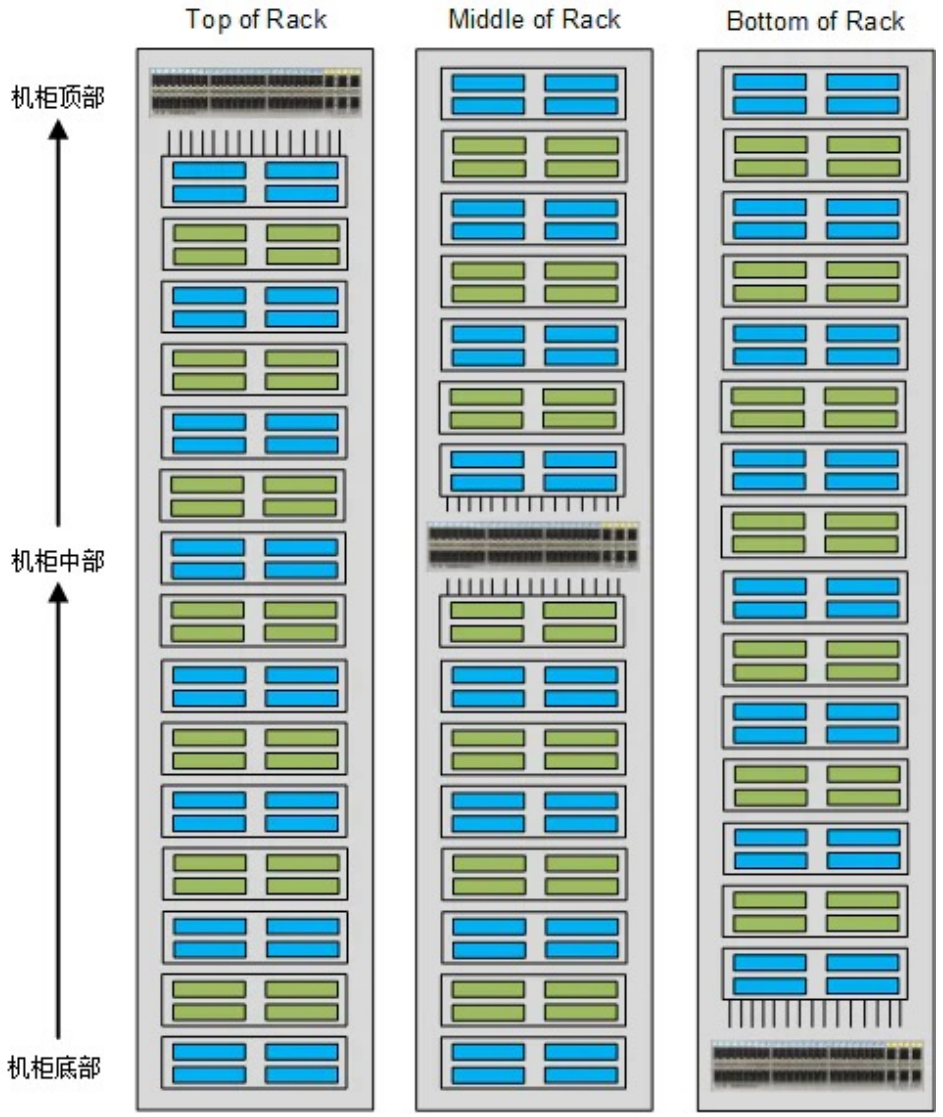
Middle of Rack

- 缺点是节点中 8 块 GPU 必须连接到不同距离叶交换机，而不是更靠近服务中间机架上。
- **单轨方案：**当交换机位于同一机架时，可以使用无源直连电缆（DAC）和有源电缆（AEC）
- **多轨方案：**交换机不一定位于同一机架，必须使用光模块。此外，叶交换机到脊交换机的距离可能 > 50m，必须使用单模光模块。



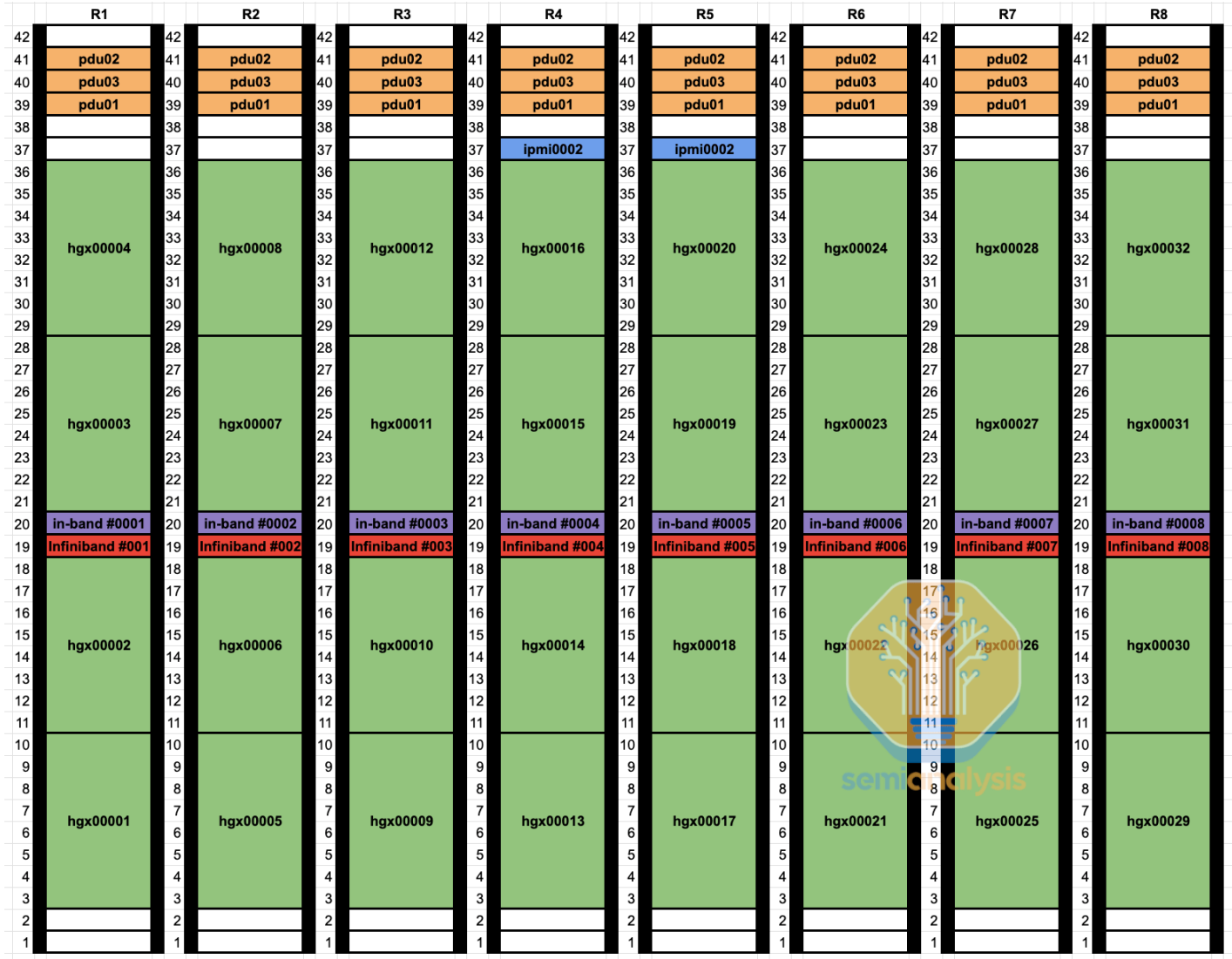
Middle of Rack

- 使用无轨优化的中间机架设计，可以用更廉价的铜缆取代连接 GPU 和叶交换机的光模块，在 GPU 网络中实现 25-33% 铜缆覆盖。



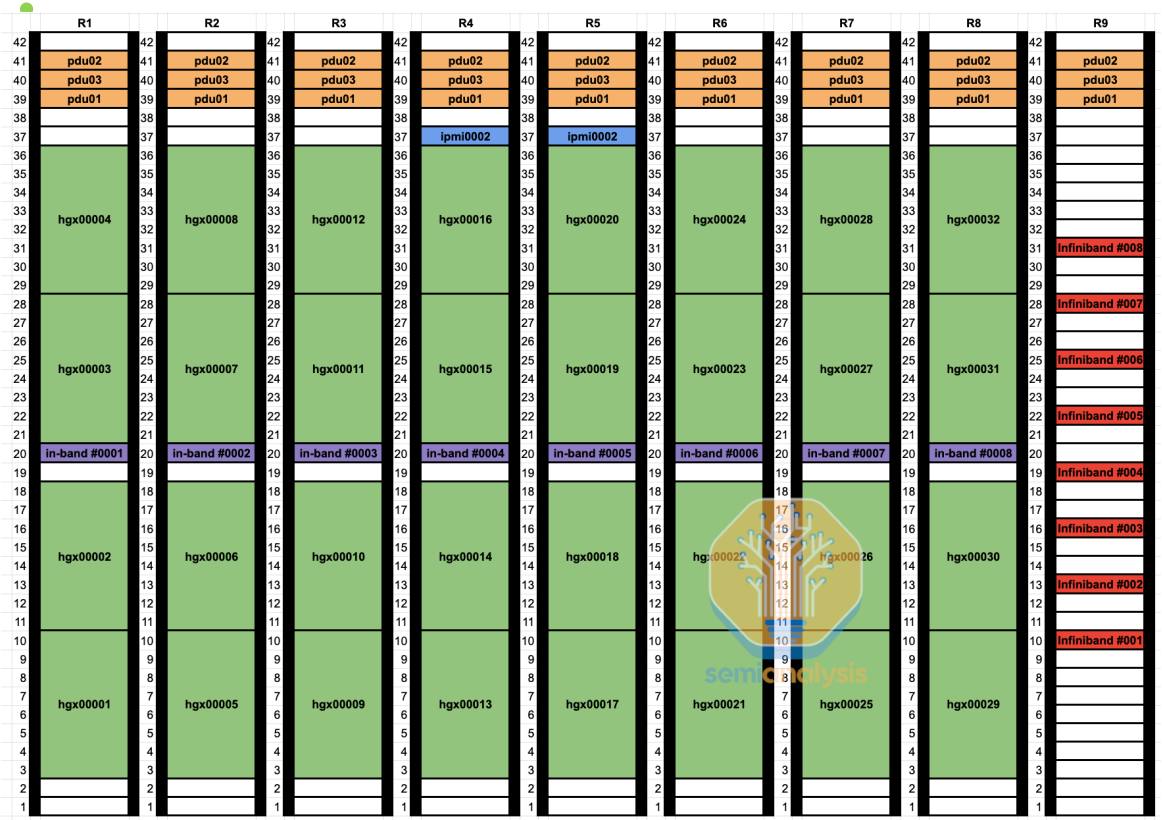
Middle of Rack

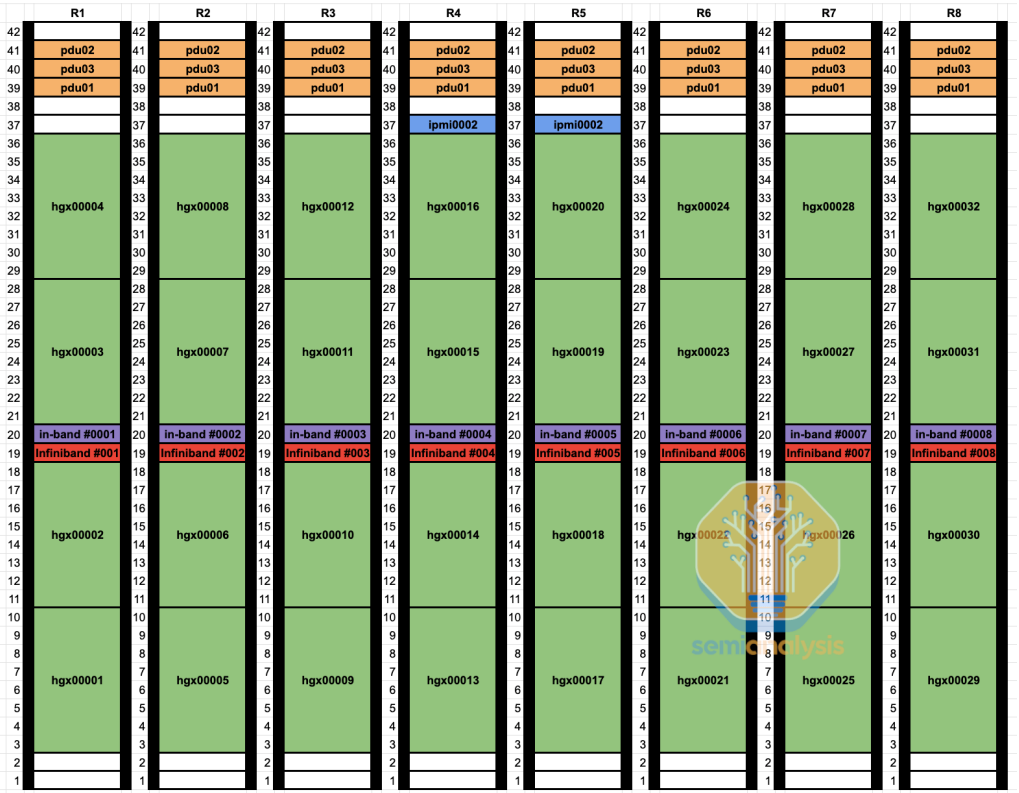
- 每个 GPU 与叶交换机连接不再是先连接到电缆托架、再从侧面穿过 9 个机架连接到专用的导轨优化叶交换机上；
- 将叶交换机放在机架中间，从而让每个 GPU 都能使用 DAC 铜缆；
- DAC 电缆运行温度更低、能耗更低、可靠性更高，实现更少 flapping（网络链路间歇性瘫痪）和故障；



对比

- 一个Quantum-2 IB Spine 交换机，使用 DAC 铜缆耗电 ~747W，使用多模光模块时，能耗会增加到 1,500W





03

故障恢复与运维

可靠性问题

- GPU HBM ECC 错误、GPU 驱动器卡死、光模块故障、网卡过热以及计算节点宕机或出错等
- 训练时为防止 HBM ECC 等错误，需要对 CPU 内存或 NAND SSD 进行 Checkpointing 检查

Component	Category	Interruption Count	% of Interruptions
Faulty GPU	GPU	148	30.1%
GPU HBM3 Memory	GPU	72	17.2%
Software Bug	Dependency	54	12.9%
Network Switch/Cable	Network	35	8.4%
Host Maintenance	Unplanned Maintenance	32	7.6%
GPU SRAM Memory	GPU	19	4.5%
GPU System Processor	GPU	17	4.1%
NIC	Host	7	1.7%
NCCL Watchdog Timeouts	Unknown	7	1.7%
Silent Data Corruption	GPU	6	1.4%
GPU Thermal Interface + Sensor	GPU	6	1.4%
SSD	Host	3	0.7%
Power Supply	Host	3	0.7%
Server Chassis	Host	2	0.5%
IO Expansion Board	Host	2	0.5%
Dependency	Dependency	2	0.5%
CPU	Host	2	0.5%
System Memory	Host	2	0.5%

Table 5 Root-cause categorization of unexpected interruptions during a 54-day period of Llama 3 405B pre-training. About 78% of unexpected interruptions were attributed to confirmed or suspected hardware issues.

Thank you

把AI系统带入每个开发者、每个家庭、每个组织，构建万物互联的智能世界

Bring AI System to every person, home and organization for a fully connected, intelligent world.

ZOMI

GitHub https://github.com/chenzomi12/AIFoundation

Reference 引用

1. https://www.youtube.com/embed/Jf8EPSBZU7Y
2. https://www.youtube.com/watch?v=Jf8EPSBZU7Y&t=1s