ZOMI

高速互联：RDMA 基本概述

Content

1. AI时代为什么需要RDMA
2. RDMA的核心原理
3. RDMA与传统网络对比
4. RDMA支持的三种主流协议：
   - InfiniBand
   - RoCE（RDMA over Converged Ethernet）
   - iWARP

01

为什么需要RDMA

AI时代为什么需要RDMA

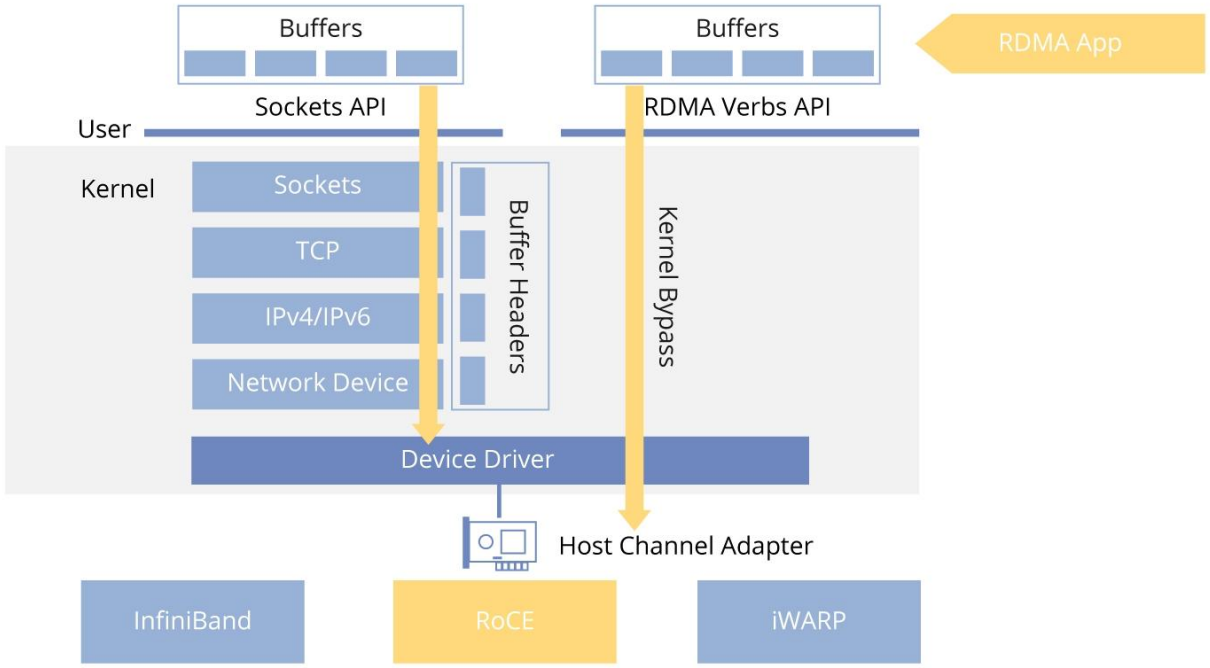
- **GPU算力增长远超网络带宽提升**
  - AI训练中万亿参数模型（如GPT-4）需数百GPU协同，单卡通信带宽需求超200Gbps。
  - 计算/通信比失衡：在8卡集群中，通信耗时占比高达90%（单卡仅10%），**网络成为系统瓶颈**。
- **参数同步的实时性要求**
  - 梯度同步需在毫秒级完成，传统TCP/IP延迟（50—100μs）导致GPU长时间闲置。**RDMA将延迟降至1—5μ s，提升集群利用率30%以上。**
  - Meta实测：AI工作负载33%时间浪费在网络等待，RDMA显著缩短作业完成时间（JCT）
- **传统TCP/IP通信在AI时代的瓶颈：**
  - **多次数据拷贝**：数据需在应用内存与内核缓冲区间复制，消耗CPU资源；
  - **高延迟**：内核协议栈处理增加微秒级延迟；
  - **CPU利用率高**：大规模数据传输时CPU成为瓶颈

02

RDMA的核心原理

什么是RDMA

- RDMA（Remote Direct Memory Access，远程直接内存访问）是一种高性能网络通信技术，允许计算机直接通过网络访问另一台计算机的内存，**无需操作系统内核和CPU介入**。
- 其目标是实现**零拷贝、零中断、低延迟**的数据传输，它解决了传统网络通信中的性能瓶颈问题，尤其在数据中心、高性能计算（HPC）和AI等场景中至关重要。



RDMA核心原理

RDMA的核心是通过网卡硬件（如支持RDMA的RNIC）实现跨节点的直接内存访问，其核心特性包括

- **零拷贝（Zero-Copy）**
  - 数据直接从发送端应用内存写入接收端应用内存，无需经过内核缓冲区、套接字缓存等中间复制环节。
  - 传统通信需多次内存拷贝（应用层→内核→网卡），而RDMA通过网卡硬件直接读写用户内存，减少数据搬运开销。
- **内核旁路（Kernel Bypass）**
  - 应用程序通过用户态驱动直接操作RDMA网卡（RNIC），无需内核协议栈处理数据。
  - 优势：避免上下文切换、系统调用等CPU开销，降低延迟至微秒级（传统TCP/IP为毫秒级）。
- **CPU卸载（CPU Offload）**
  - 数据传输协议（如分段、校验和、流量控制）由智能网卡硬件处理，CPU仅负责发起传输指令，不参与数据搬运。
  - 效果：释放CPU资源，使其专注于计算任务，提升系统整体效率。

03

RDMA与传统网络对比

RDMA与传统网络对比

对比维度	RDMA	传统网络（TCP/IP）
传输机制	网卡直接读写远程内存（零拷贝）	数据需经内核协议栈封装/解析
性能表现	微秒级（通常1—5μs）	毫秒级（10—100μs）
CPU负载	极低（<5%）	高（30%–100%，随带宽提升）
内存拷贝次数	零拷贝	4–6次（用户态↔内核态↔网卡）
典型应用场景	HPC、分布式存储（Ceph）、AI训练、实时交易	Web服务、文件传输、普通计算
部署成本与复杂度	较高（需RDMA网卡+无损网络）	低（通用网卡+标准以太网）

04

RDMA 支持的三种主流协议

RDMA支持的三种主流协议

RDMA（远程直接内存访问）技术支持的三种主要协议为 InfiniBand（IB）、RoCE（RDMA over Converged Ethernet） 和 iWARP（Internet Wide Area RDMA Protocol）

特性	InfiniBand (IB)	RoCE	iWARP
协议类型	原生RDMA专用协议	基于以太网的RDMA	基于TCP/IP的RDMA
网络要求	专用IB交换机、网卡和线缆	支持RoCE的网卡+无损以太网交换机	支持iWARP的网卡+标准以太网交换机
适用场景	超算中心、AI万卡集群（如NVIDIA DGX）	云数据中心、分布式存储、AI训练	广域网跨数据中心通信

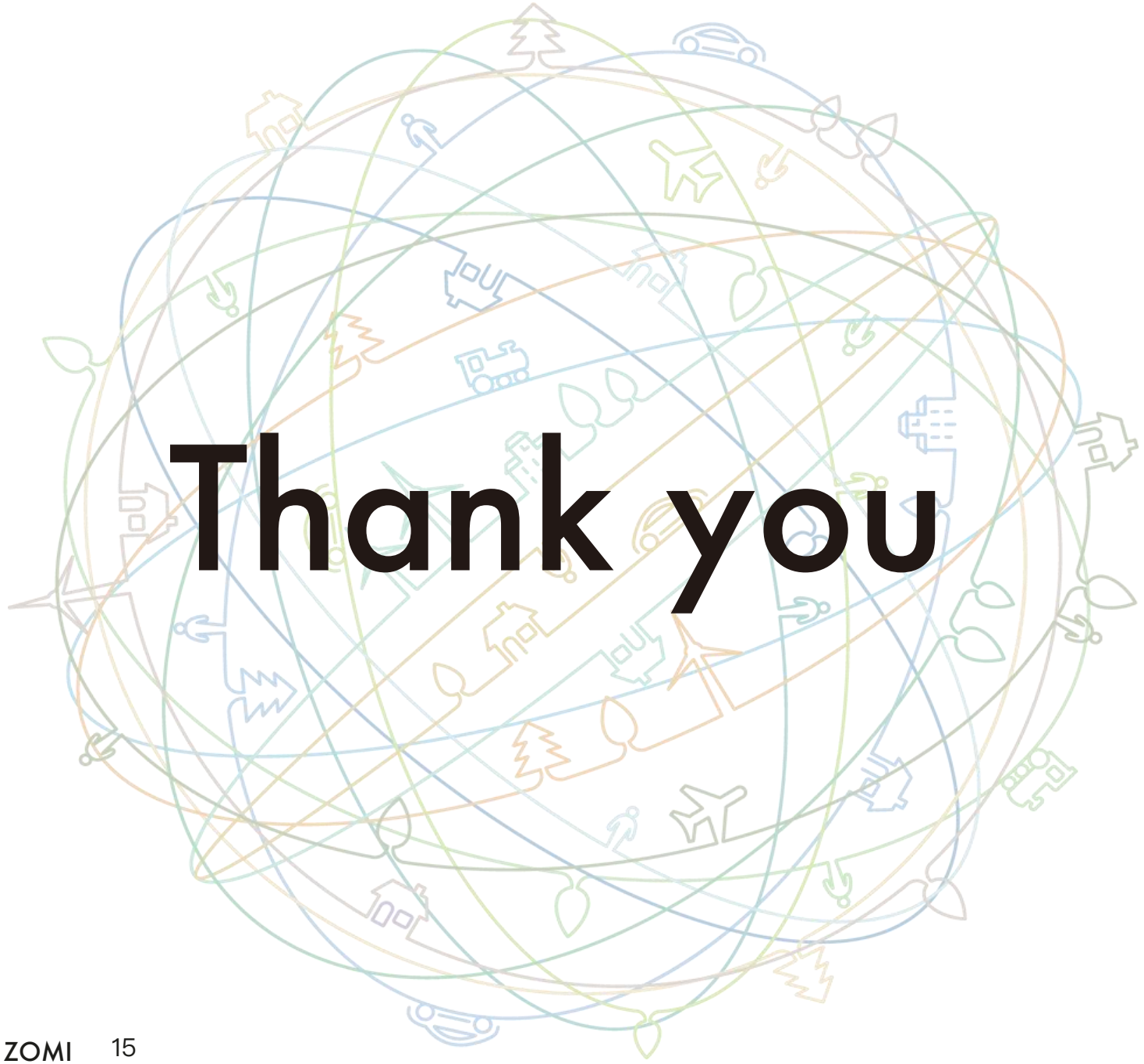
InfiniBand (IB)

- **技术架构：**
  - 专为RDMA设计的端到端协议，涵盖物理层到传输层。
  - 通过专用网卡（HCA）和交换机实现内存直接访问，完全绕过操作系统内核，支持零拷贝和内核旁路。
- **性能优势：**
  - 超低延迟（可低于1μs），高带宽（HDR InfiniBand达400Gbps）
  - 原生拥塞控制机制（基于信用算法），保证无丢包传输。
- **局限性：**
  - 生态封闭：需全套专用设备（如NVIDIA Mellanox方案），成本高昂；
  - 跨数据中心扩展困难，主要限于本地集群。

RoCE (RDMA over Converged Ethernet)

- **技术演进**
  - RoCEv1：基于以太网链路层（二层），仅支持同子网通信，通过Ethertype 0x8915标识报文；
  - RoCEv2（主流）：基于UDP/IP协议栈，支持三层路由（UDP端口4791），可通过ECMP实现负载均衡。
- **关键依赖：无损以太网，需启用以下技术避免丢包**
  - PFC（基于优先级的流量控制）：为RDMA流量预留专用队列，触发反压机制；
  - ECN（显式拥塞通知）：通过IP头标记拥塞，动态降速。
- **性能表现**
  - 延迟可低至2μs（25GbE下比TCP带宽提升30%）；
  - 成本显著低于IB，兼容现有以太网基础设施。

- **技术原理**
  - 将RDMA语义封装在TCP/IP协议栈中，通过网卡硬件卸载TCP处理（TOE技术），减少CPU开销。
- **优势与局限**
  - 支持标准以太网交换机和广域网路由，扩展性最佳；
  - TCP协议栈引入额外延迟（序列化/重传机制），性能弱于IB/RoCE；
  - 大量TCP连接占用内存资源，大规模集群效率低。
- **应用场景：**
  - 跨数据中心通信、金融行业广域网低延迟交易（如Chelsio方案）



Thank you

把 AIInfra 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 Infra to every person, home and organization for a fully connected, intelligent world.

ZOMI

GitHub github.com/Infrasys-AI/AIInfra

Book infrasys-ai.github.io

引用与参考

1. https://community.fs.com/blog/remote-direct-memory-access-rdma.html
2. https://cloud.tencent.com/developer/article/2508336
3. https://doc.mbalib.com/view/903fb2f7b2b20781e8423af9dfa7829e.html
4. https://blog.51cto.com/u_16213715/13786410
5. https://blog.csdn.net/gs80140/article/details/145033932
6. https://blog.csdn.net/zuopiezia/article/details/144340106
7. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3NTY1NjAyMw==&mid=2247486165&idx=1&sn=594c9eba7088a396134e02017d3f61eb&chksm=9e3422c20f13945922c45958caf838dab92f230e78da1d29f6f1d7e4f3624e207173395bd60d#rd
8. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzkwOTYwMDYxMQ==&mid=2247504048&idx=1&sn=a44986e6a3570a76a73d773585a1a2dd&chksm=c04e027f60a11f22cbcacaca65d95b7163e439056b77d4e9e163afb69c352992e3517af75cff#rd
9. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3NTY1NjAyMw==&mid=2247486165&idx=1&sn=594c9eba7088a396134e02017d3f61eb&chksm=9e3422c20f13945922c45958caf838dab92f230e78da1d29f6f1d7e4f3624e207173395bd60d#rd