

5G 环境下系统级仿真建模与关键技术评估

System Simulation Modeling and Key Technology Evaluation in 5G

李凯/LI Kai¹

徐景/XU Jing²

杨旸/YANG Yang²

(1. 上海无线通信研究中心, 上海 201210;
2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(1. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 201210, China;
2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

计算机仿真在移动通信系统的技术研究和标准开发中是评估系统性能的一个非常强大的工具。现代无线通信系统是一个异常复杂的系统,其复杂性体现在应用场景、网络结构等多个方面。第5代移动通信(5G)的候选技术更丰富,应用场景更复杂。

5G 软件仿真测试系统的设计和开发是在早期技术的基础上继承和发展的,早期仿真平台对5G软件仿真的搭建有重要的参考价值。同时,由于5G系统将引入更多新功能和新技术,需要深入分析各种候选技术的特征和实现方案,才能高效设计和实现5G软件仿真系统。一个完整的仿真系统组成,如图1所示。

1 5G 系统仿真场景

1.1 5G 系统仿真假定

5G 移动通信系统需要满足更加

收稿时间: 2016-02-18
网络出版时间: 2016-04-25

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0041-006

摘要: 根据5G关键技术特征给出了5G系统仿真场景,并提出了一种基于5G系统仿真平台的仿真建模及实现方法。运用动态仿真建模、计算资源虚拟化管理、多核并行仿真以及硬件加速仿真技术建设系统仿真平台,对5G候选关键技术进行评估,可以解决由于5G高复杂度及多变的仿真环境带来的部分问题,并能够提高仿真效率,增强5G系统仿真平台的扩展性。

关键词: 5G 候选关键技术; 仿真建模; 评估指标; 系统仿真平台

Abstract: In this paper, 5G system simulation scenarios based on the features of 5G key technology is introduced, and a simulation modeling and realization method of 5G system simulation platform is presented. By using dynamic simulation modeling, computing resources virtualization management, multi-core parallel simulation and hardware accelerated simulation technology in the system simulation platform construction and 5G key technology evaluation, part of problems bringing by 5G high complex and changeable simulation environment can be solved, and the simulation efficiency can be improved, meanwhile, the scalability of 5G system simulation platform can be enhanced.

Key words: 5G candidate key technology; simulation modeling; evaluation index; system simulation platform

多样化的场景和极致的性能挑战。面对多样化的应用场景,5G的帧结

构参数可灵活配置,以服务不同类型的业务。针对不同频段、场景和信道

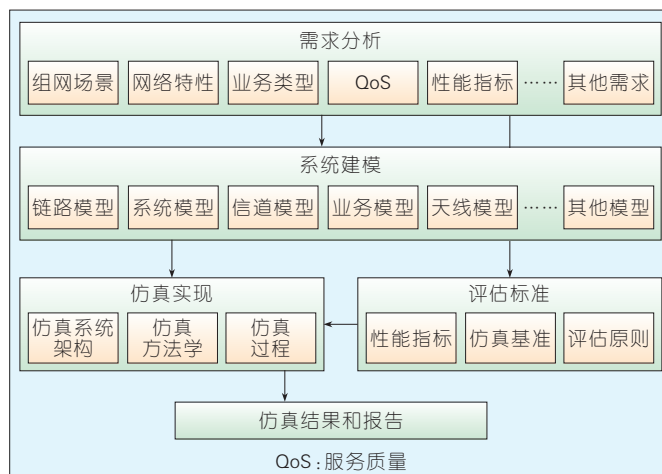


图1▶
仿真系统的组成和
实施过程

环境,可以选择不同的参数配置,具体包括带宽、载波频率等,参考信号和控制信道也可灵活配置以支持大规模天线、新型多址等新技术的应用,按需选取最优技术组合及参数配置。下面我们将分别介绍大规模技术和超密集网络(UDN)技术条件下的系统仿真基线参数配置。

(1)大规模天线部署

在大规模天线部署条件下仿真场景集中表示于表1中。针对大规模多输入多输出(MIMO)下的3种仿真场景我们给出了系统仿真相关基线参数,如表2所示^[1]。

(2)超密集网络部署

超密集网络(UDN)是5G核心技术之一。我们对UDN的仿真评估也给出了仿真场景及相关基线参数,如表3所示。

1.2 5G 系统性能评估指标

5G网络相对于4G网络不仅仅是“量”的变化,比如容量、速率的变化,还包括其“质”的变化,包括虚拟化、可定义等网络基本特征的变化。原有业务模型下的平均用户吞吐率、边缘用户频谱效率等之外,连接数密度、流量密度等是5G网络新引入的关键业绩指标(KPI)指标。随着5G技术研究的不断深入,可以预见还会出现新的评估指标。对这些可直接度量的指标的设计一方面需要结合新业务的特点,另一方面需要充分借鉴以往KPI指标经验。我们将从以下几个方面介绍无线性能评估指标:

(1)无线覆盖性能KPI指标

无线覆盖性能的KPI指标主要有参考信号接收功率(RSRP)、信干噪比(RS-SINR)、Geometry(G)以及累积分布函数(CDF)统计。

RSRP是代表无线信号强度的关键参数,是在某个符号内承载参考信号的所有资源元素(RE)上接收到的信号功率的线性平均值^[4];RS-SINR定义为 $RS_SINR = \frac{RSRP}{RS_RSSI - RSRP}$,

▼表1 仿真场景配置参数

仿真场景	3D-UMi	3D-UMa
站间距/m	200	500/200
UE 移动性/(km/h)	3	
UE 数量(全缓冲业务)	10/15/30	
eNB 高度/m	10	25
UE 和 eNB 间最小距离/m	10	35
NB:基站 UE:用户设备 UMa:城市宏小区 UMi:城市微小区		

▼表2 系统仿真基线参数

参数	仿真假设
信道模型	3D UMa ISD 500/200 3D UMi ISD 200
带宽/ MHz	10
载波/ GHz	2
发射功率/ dBm	3D UMi: 41/44 (10/20 MHz) 3D UMa (ISD 500): 46/49 (10/20 MHz) 3D UMa (ISD 200): 41/44 (10/20 MHz)
天线配置	发射器: 64Tx (M, N, P, Q=8, 4, 2, Q) Q=8, 16, 32, 64 128 天线 (M, N, P, Q=8, 8, 2) 接收器: 2Tx (M, N, P=1, 1, 2)
反馈方案	Rel-12 增强 CSI 反馈、PUSCH 模式 3-2、理想信道协方差 R、PMI 反馈
调度方式	比例公平
HARQ	跟踪合并
最大重传数	4
业务模型	● FTP1, RU=70%/50% (必选), 20% (可选); ● 全缓冲
CSI: 信道状态信息 HARQ: 混合自动重传请求 PMI: 预编码矩阵指示 UMa: 城市宏小区 FTP: 文件传输协议 ISD: 站间距 RU: 资源单元 UMi: 城市微小区	

▼表3 UDN 系统仿真基线参数

仿真场景	办公室	密集住宅	密集街区	大型集会	公寓
站间距/m	宏基站: 500 小基站: 20~100				
载波频率/GHz	宏基站: 2.0 小基站: 3.5 (优先) 或 2.0				
带宽/MHz	宏基站: 20 小基站: 10/20/40/100				
信道模型	ITU InH	宏基站: 3D UMa 小基站: 3D UMi	室外: ITU UMa、 ITU UMi 室内: ITU InH	宏基站: 3D UMa 小基站: 3D UMi	ITU InH
穿透损耗	2 GHz 室内 UE: 20 dB+0.5 din 不同层间穿透: 18.3n((n+2)/(n+1)-0.46) dB 3.5 GHz 室内 UE: 23 dB+0.5 din 室外 UE: 0 dB 内墙损耗: 5 dB				
业务模型	第1次评估 full buffer 业务; 第2次评估 FTP, 视频流业务(单业务 FTP, 文件大小 0.5 或 2 Mbytes); 第3次评估混合业务、FTP 和视频流混合				
FTP: 文件传输协议 InH: 室内热点 ITU: 国际电信联盟 UMa: 城市宏小区 UMi: 城市微小区					

RS_RSSI代表所有基站的总接收信号强度; Geometry (G) 定义为 $G = \frac{\hat{I}_{or1}}{I_{oc}} = \frac{\hat{I}_{or1}}{\sum_{j=2}^{N_g} \hat{I}_{orj} + N}$, \hat{I}_{orj} 为第j个基站的

平均接收功率(\hat{I}_{or1} 为服务小区), N 为噪声功率, N_g 为干扰基站的数量。

(2)容量性能KPI指标

容量性能主要从整网和用户两方面评估:整网容量KPI考虑连接数

密度和流量密度,而用户容量 KPI 则考虑单终端业务量。连接数密度是指单位面积的平均终端数,单位为终端数/km²;流量密度是指单位面积的平均业务量,单位为 bps/km²;单终端业务量是指每终端每月的平均业务量,单位为 byte/month/device。

(3) 速率性能 KPI 指标

用户体验最直接的 KPI 指标是用户速率,我们需要区分下载速率(DL)和上传速率(UL),用户速率评估 KPI 主要采用:平均、5%、50%、95% 用户吞吐率,以及 CDF 统计^[2-4]。

(4) 移动性能指标

对于移动状态的用户,在移动过程中业务连续、稳定是基本要求,移动性能评估 KPI 一般采用无线链路失败率、切换失败率、乒乓切换率等,可以参考文献[5]。

(5) 时延性能指标

时延性能指标主要有往返时间(RTT)时延(用 T_{RTT} 表示)和单程时间(OTT)时延(用 T_{OTT} 表示)^[6]。RTT 时延定义为 $T_{RTT}=T_{A1}-T_{S1}$, OTT 时延定义为 $T_{OTT}=T_{A2}-T_{S1}$,其中 T_{S1} 为设备 1 发送数据包的起始时间, T_{A2} 为设备 2 收到设备 1 数据包的时间,设备 2 收到数据包后将会发送反馈消息, T_{A1} 则为设备 1 收到设备 2 发送的反馈消息的时间。

(6) 能耗性能指标

能耗是衡量网络能量效应的 KPI,能效有两种定义方式,如公式(1)^[6]所示:

$$\lambda_r = \frac{E}{I} = \frac{P}{R} \text{ in [J/bit] or [W/bps]} \quad (1)$$

$$\lambda_a = \frac{P}{A} \text{ in [W/m}^2\text{]}$$

其中, E 为给定评估时间内对应功率 P 消耗的能量, I 为对应传输速率 R 的消息容量, A 为覆盖面积。

2 5G 关键仿真技术

本节重点阐述了 5G 系统仿真软件在平台架构设计及系统仿真过程中运用的关键技术,利用这些关键技术有效提高仿真效率,满足 5G 仿真

需求。

2.1 动态仿真建模技术

5G 技术带来了更加复杂的组网场景和业务类型,也增加了各类新技术。传统的采用针对特定场景编码实现的仿真设计模式效率很低,远远不能满足日益增长的仿真需求,必须采用高复用的建模技术,因此提出了动态仿真建模技术。

动态仿真建模技术的核心思想是对网络分层和建模,将各层次的仿真对象模型进行组件化设计^[7],同时基于仿真场景、业务模型映射得到仿真模型组件和仿真参数,再通过动态配置的方法组合成为具体的仿真流程。由于仿真对象模型设计实现了组件化,主要的仿真设计实现能够得到充分复用,一方面提升了仿真设计和开发效率,另一方面也提升了仿真平台的可扩展能力。

动态仿真建模技术包含两项关键技术:功能库和参数库的生成;动态分析和配置机制。

(1) 功能库和参数库的生成

输出仿真平台的基本功能模块,根据仿真需求进行建模,抽象分解出公共库和特性库两类,通过智能接口实现功能的配合实用,同时满足功能的可扩展性。将功能库和参数库分开设计的目的也是为了保证模型适应于不同的仿真场景和仿真需求,做到充分的解耦。

(2) 动态分析和配置机制

在仿真运行过程中提供分析和配置机制,参与仿真的全过程。包括对仿真需求进行分解,并映射到不同的功能库和参数库,再根据仿真的具体要求配置生成仿真流程。

根据仿真需求分解出对应的仿真模型,例如,软件定义网络(SDN)技术要求控制面和用户面分离,网络功能虚拟化(NFV)要求网络功能从专用硬件设备中解耦出来,UDN 中提出的虚拟小区概念等。

根据模型生成仿真参数库,包括

系统规格、场景参数、各项技术的配置参数等。以仿真模型为中心,基于仿真模型建立组网场景、网络功能的参数化模板,通过合理组合这些参数化模板减少参数库的复杂度。

根据模型映射到对应的功能库。功能库可以通过灵活的接口设计实现解耦和可扩展,根据仿真需求将映射的功能库和参数库有机的组织成为一个完整的仿真流程。将参数库、功能库、仿真流程进行动态配置形成具体的仿真任务,仿真任务直接面向用户,需要提供友好的配置管理界面。

由以上分析可以看出:实现动态仿真建模的关键点在于模型、库组件和参数的设计,通过运用分层、封装、接口解耦等方面的设计解决概念模型和实现模型之间的耦合,才能达到技术变化对实现影响最小的目的。

2.2 计算资源虚拟化管理技术

当前提升仿真计算效率的主要手段是计算并行化,由于计算资源可以分布在不同的物理设备上,如何合理配置管理资源就成为核心问题。因此,我们提出了计算资源虚拟化管理技术。

资源虚拟化首先将仿真需求映射为可单独部署的计算任务,基于这些计算任务再分解为可单独部署的并行子任务,根据其特点配置相应的虚拟资源,部署在本地的并行计算任务需要分配计算资源、存储资源,部署在从节点上的计算任务还需分配足够的通信资源,以避免数据无法及时传输造成延时。

将各类硬件资源虚拟化为计算、存储和通信 3 类虚拟资源,并将虚拟资源动态绑定给计算任务,仿真子任务所需要的虚拟资源需要提前评估,不同仿真子任务有不同需求,可通过仿真代码静态分析以及运行时统计等手段分析得到,并根据仿真目标确定各个仿真子任务的资源需求。

随着底层软件以及硬件平台的

不断发展,可用的并行虚拟化技术较为丰富^[8],比如 MATLAB 提供的 parfor、单程序多任务 (SPMD)、MATLAB 分布式计算引擎 (MDCE) 等并行工具,以及适用于多种开发语言的消息传递接口 (MPI)、OpenMP 等并行编程机制。对于具体的仿真实现来说,不但需要底层的并行技术手段,还需要仿真应用程序也实现并行化设计。仿真应用程序的并行化设计很难给出通用方法,需结合业务特点专门设计并行算法,也是实现仿真系统并行虚拟化的关键路径。

2.3 多核并行仿真技术

仿真软件的并行化是仿真平台多核并行设计的关键,能利用现有硬件资源达到最优效果。根据需求先从功能、算法、操作对象等角度将仿真软件并行化分解;其次通过对仿真功能模块的合理划分设计,减少并行子任务的通信数据量,保证各个并行子任务之间的运算量相当,减少因任务同步处理所需的等待时间。

中央处理器 (CPU)+图形处理器 (GPU) 的异构方案作为多核 CPU 并行处理的演变方案,也为提升仿真计算的速度提供了可能^[9]。CPU 擅长复

杂逻辑运算,而 GPU 往往拥有上百个流处理器核心,其设计目标是以大量线程实现面向大吞吐量的数据并行计算,其单精度浮点计算能力可达同期 CPU 的 10 倍以上,适合处理大规模数据并行计算。因此,采用 CPU+GPU 的异构并行架构,利用多核 CPU 并行执行复杂的逻辑计算,利用 GPU 处理数据并行任务,两者协同工作,发挥计算机并行处理能力。

图 2(a) 中给出了一个典型的异构多核架构,可以看出在多核 CPU 端使用 OpenMP,而在 GPU 使用计算统一设备结构 (CUDA) 进行处理,任务的划分则由程序和操作系统层面指定。两部分均采用外设部件互连标准 (PCI-E) 总线进行互联。

多核 CPU-GPU 异构平台具有任务级和数据级多个层次的并行执行能力,在进行负载分配时要将这些计算能力充分利用起来,可以考虑如图 2(b) 所示的仿真模型结构。

2.4 硬件加速仿真技术

硬件加速仿真技术使用硬件模块来替代软件模块以充分利用硬件所固有的快速特性。通常采用计算能力和逻辑处理能力都非常强的

性能现场可编程门阵列 (FPGA) 板卡。硬件加速仿真技术的主要分为 3 个方面:

(1) 基于 FPGA 的高性能硬件加速关键技术研究,包括:高速并行处理、软硬件仿真任务分块及映射、高精度信号处理;

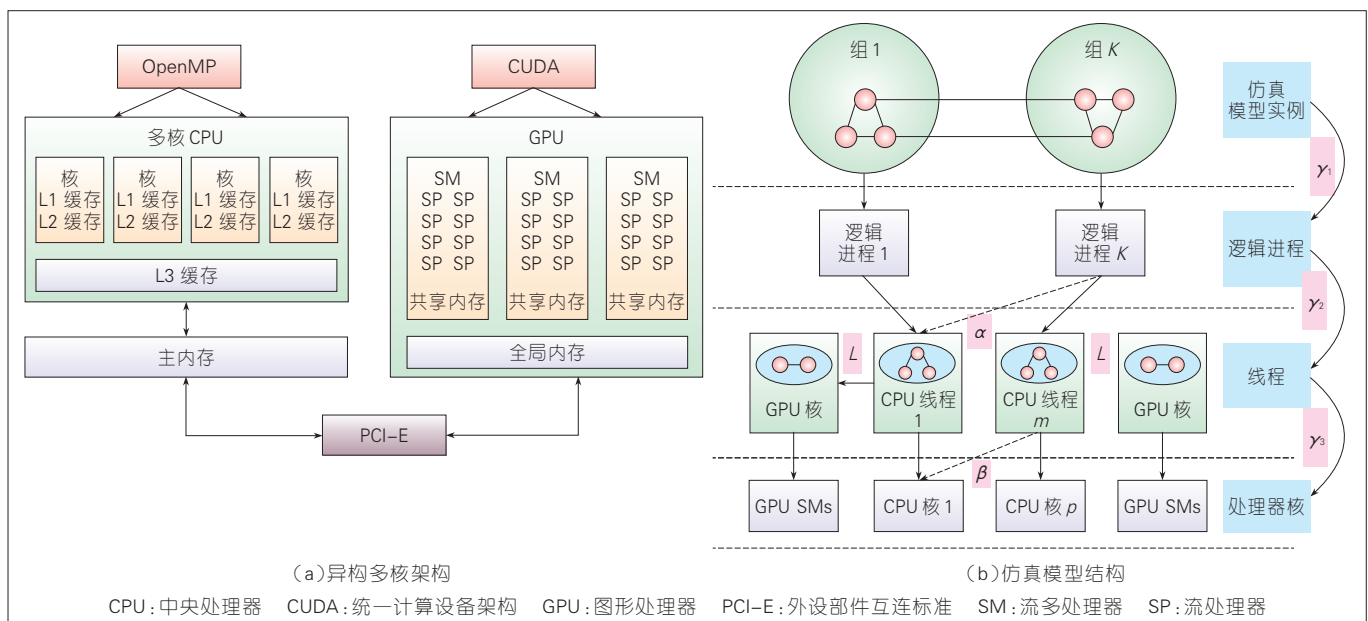
(2) 硬件加速和软仿真平台相结合的接口及中间件设计,包括基于 C 仿真代码的适配、接口层的中间件设计、可重配置计算的设计;

(3) 可重配置的 FPGA 硬件加速卡设计,包括高速 PCI-E 接口设计、高速 USB 3.0 接口与主机的数据交互。

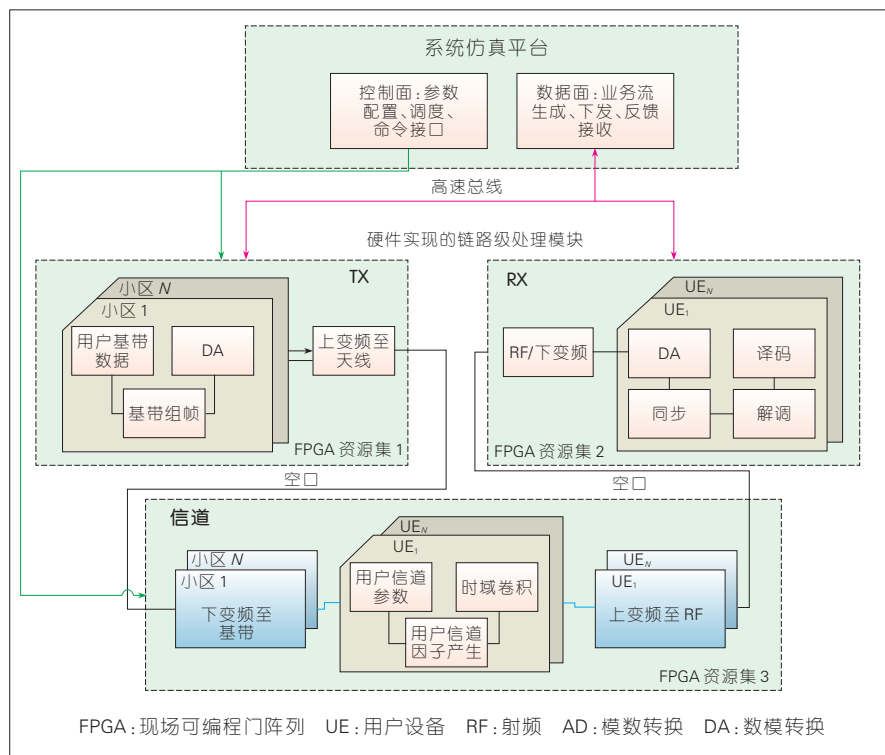
如图 3 所示,在系统仿真平台中部分链路采用了硬件实现的链路。这种软硬件联合仿真方法能够充分发挥硬件的高速处理能力,使得部分链路的系统仿真性能接近实时级别,结合系统仿真平台较为完善的系统功能,就能够更为真实地仿真对系统传输时延等一系列指标要求很高的系统应用场景。

3 5G 候选关键技术评估

本节以 5G 关键技术大规模 MIMO (MU-MIMO) 为例,说明如何应用前述的各项关键技术完成 MU-



▲ 图 2 CPU+GPU 异构多核结构



▲图3 软硬件联合仿真的一种系统实现框架

MIMO技术在仿真系统中的设计和实现,以达到减少仿真计算复杂度、加速仿真计算速度的目的。

(1) 仿真参数说明

采用MU-MIMO模式,仿真长期演进(LTE)下行系统工作性能。基站发射天线数为128根,单小区内同时调度15个用户,构成MU-MIMO的信道矩阵。

(2) 仿真计算环境说明

硬件: GPU服务器XR-4802GK4,其中CPU配置为2颗Intel Xeon Ivy Bridge E5(3.0 G,单颗10核,20线程),GPU配置为8片TESLA K20;

软件: MATLAB R2014a。

(3) 计算量分析

根据MU-MIMO特性可知,计算量主要分布在信道计算、预编码计算、接收SINR计算。设子载波数为 N_c ,OFDM符号数为 M ,基站天线数为 N_t ,用户数(单天线)为 N_r ,接收天线数为 N_r ,系统内小区数为 C 。

(a) 3D信道

仅以时域信道转为频域信道的

快速傅里叶变换(FFT)变换计算次数来分析,一个小区的3D信道FFT变换的数量约为 $M \times N_t \times N_r$,则在天线规模为下行 128×15 的情况下,相比4G天线规模为 2×1 的场景,计算量之比为960倍。

(b) 发射端预编码

根据仿真参数设置,发送端预编码方案为迫零算法,预编码矩阵计算如公式(2)所示:

$$W^{ZF} = H(H^H H)^{-1}, H \in C^{N_t \times N_r} \quad (2)$$

预编码的计算复杂度主要体现在矩阵的乘积和求逆两部分:在迫零算法条件下,第1部分是 $C \times N_c$ 次 $N_r \times N_r$ 维矩阵求逆;第2部分是 $C \times N_c$ 次 $N_t \times N_r$ 维矩阵和 $N_r \times N_r$ 维矩阵的乘法。一般各类矩阵计算的算法复杂度为 $O(n^3)$,计算量随天线数的3次幂增加。

(c) 信干噪比计算

根据MIMO信号模型,可以分析得到计算量的大致规模,如公式(3)所示:

$$y_{jm}^{dl} = \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{l=1}^L \sqrt{\lambda_l} h_{ljm}^H \sum_{k=1}^K W_{lk} X_{lk}^{dl} + n_{jm}^{dl} = \sqrt{\rho_{dl} \lambda_j} h_{ljm}^H W_{jm} X_{jm}^{dl} + \underbrace{\sqrt{\rho_{dl} \lambda_j} h_{ljm}^H \sum_{k=1, k \neq j}^K W_{jk} X_{jk}^{dl}}_{\text{intra-cell interference}} + \underbrace{\sqrt{\rho_{dl}} \sum_{l=1, l \neq j}^L \sqrt{\lambda_l} h_{ljm}^H \sum_{k=1}^K W_{lk} X_{lk}^{dl}}_{\text{intra-cell interference}} + n_{jm}^{dl} \quad (3)$$

计算一个小区的信号功率需要两次 N_t 维向量乘法,乘法次数为 $2N_t+1$,计算干扰功率(含小区内和小小区间干扰)需要 $C \times (2N_t+1)$ 次乘法,总乘法次数为 $(C+1) \times (2N_t+1)$ 。

从以上分析可知:MU-MIMO特性的计算量主要集中在信道计算、发射端预编码和接收信干噪比计算模块中,其中发射端预编码计算量随天线数的3次幂增长,是计算开销最大的模块,其次是信道计算,根据阿姆达尔定律,这两个模块也是计算加速最为关键的优化目标。

(4) 优化方案

根据不同的模块的特点,我们可以结合前面的关键技术制定加速优化方案。

(a) 信道计算

在给定仿真参数的条件下,无线链路信道系数和系统调度等行为无关,因此可以预先完成信道计算,并将计算结果保存在硬盘中,仿真系统初始化时可以直接读取信道矩阵,使用预先计算好的结果,省去信道计算时间,实际时间开销仅仅取决于读取内存的时间。

(b) 发射端预编码

发射端预编码主要涉及大矩阵的乘法和求逆计算,这部分计算可以充分利用CPU以及GPU的多核计算能力,在子载波层次进行并行计算。由每个GPU完成矩阵求逆和乘法计算,并行最大可以并行 $C \times N_c$ 路,在本测试样例中,可以并行 $57 \times 300 = 17100$ 路,在GPU核足够多的情况下,综合考虑传输带宽的影响,基本可以满足对发射端预编码的加速优化需求。在本测试样例中,由于仅采用了一台GPU服务器,计算资源有限,因此实际加速效果受限于硬件资源,在多台

组网、超算环境中可以进一步大幅提升加速效果。

(c) 信干噪比计算

此部分的计算主要是向量乘法运算,计算量相对信道计算、发射端预编码模块小得多,因此采用 CPU 加速即能够获得较好的效果。

(5) 仿真实测结果和分析

仿真实测结果如表 4、表 5 所示。根据不同模块的计算特点,采用的加速方案不同,其最终加速效果也不同。

▼表 4 MU-MIMO 在串行方案和并行方案下各个模块的计算时间开销

计算方案	1 个 TTI 的总时长/s	信干噪比计算/s	消息处理/s	预编码/s	其他模块(未并行优化)/s
串行	9 338.72	772.64	124.88	8 411.95	29.25
并行	153.92	50.8	4.12	66.03	/

TTI: 传输时间间隔 MU-MIMO: 大规模多输入多输出

▼表 5 MU-MIMO 不同模块下的加速比

加速比实测结果	总加速比(串行/并行)/s	信干噪比计算/s	消息处理/s	预编码/s
加速比	60.67	15.2	30.31	127.4

MU-MIMO: 大规模多输入多输出

信干噪比计算模块、消息处理模块采用了 CPU 并行计算方案,预编码模块采用了 CPU+GPU 的联合加速方案。从加速比来看,干扰模块的加速比要小于消息处理模块,其原因是干扰模块需要在并行计算任务之间传递大量数据,包括信号功率、信道配置、调度信息等数据,在数据传输上的时间开销要大于消息处理模块,对信干噪比计算模块进一步优化的手段,包括增加并行 CPU 核数、传输数据压缩、增加传输带宽(高速光纤传

输、反射内存技术等)等方案。预编码模块采用了 CPU+GPU 的联合加速方案,加速比可以达到 127 倍,由于受硬件资源的限制,这部分的加速效果远未达到上限。

4 结束语

由于 5G 技术的快速发展,仿真对象、场景和技术也在不断变化,仿真架构设计和评估方法也需要同步发展。文章从系统仿真场景、关键仿真技术及 5G 候选关键技术评估方面

介绍 5G 系统仿真评估,为 5G 候选关键技术的评估提供了参考解决方案,进而为 5G 网络架构设计和关键技术研发提供有效的支撑。

参考文献

- [1] 3GPP. 3D channel model for LTE: 3GPP TR36.873 [S]
- [2] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: 3GPP TR36.814 [S]
- [3] 3GPP. Small Cell Enhancements for E-UTRAN-Physical Layer Aspects: 3GPP TR36.872 [S]
- [4] 3GPP. Physical layer Measurements: 3GPP TS36.214 [S]
- [5] 3GPP. Mobility Enhancements in

Heterogeneous Networks: 3GPP TR36.839 [S]

- [6] Updated Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System with Recommendations for Future Investigations: METIS_D1.5_v1 [S]
- [7] PIRO G, GRIECO L A, BOGGIA G, et al. Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 60(2): 498-513. DOI: 10.1109/TVT.2010.2091660
- [8] DONGARRA J, FOSTER I, FOX G, et al. Sourcebook of Parallel Computing [M]. USA: Elsevier Science and Technology, 2003
- [9] BILELB R, NAVID N, BOUKSIAA M S M. Hybrid CPU-GPU Distributed Framework for Large Scale Mobile Networks Simulation[C]// 2012 IEEE/ACM 16th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, 2012. USA: IEEE: 44-53, 2012. DOI: 10.1109/DS-RT.2012.15

作者简介



李凯,上海无线通信研究中心工程师;主要研究方向为 5G 无线仿真系统设计和开发;发表论文 1 篇,已申请专利 3 项。



徐景,中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员;主要研究方向为无线网络性能统计建模及分析、5G(超密集无线网络)和软件定义无线网络;发表论文 30 篇,已申请专利 42 项,编者中文专著 1 本。



杨旸,中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员、学术委员会副主任,中科院无线传感网与通信重点实验室主任,中国通信学会“学术工作委员会”委员;主要研究方向为无线传感器网络(物联网)、新一代移动通信系统(4G/5G)、无线新技术测试验证平台等;发表论文 100 余篇,已申请专利 50 余项。

综合信息

400G 以太网标准工作组成立

在 2016 年 3 月 26 日举行的 IEEE802 全体会议上,802 执行委员会批准了 400G 以太网标准工作组成立,并随后将其命名为 P802.3bs,由 John D'Ambrosia 担任工作组主席,预计第一届工作组会议将于 2016 年 5 月

美国弗吉尼亚州北部举行。

据 IEEE400G 以太网工作组预测,平均下来,到 2015 年网络必须支持 TB 每秒的能力,而到 2020 年必须支持 10 TB 每秒的能力,这一数字将可以达到 2010 年的 100 倍。
(转载自《中国信息产业网》)