

基于云边协同的 5G 通信链路均衡 负载控制系统设计

刘 礼

(四川中移通信技术工程有限公司, 成都 610000)

摘要: 5G 通信网络中的链路密度大、传输数据量多, 极易出现负载失衡及拥塞现象, 为提高 5G 通信网络中各链路之间的均衡度, 设计基于云边协同的 5G 通信链路均衡负载控制系统; 改装链路数据采集器、处理器、交换机和负载控制器, 加设云端服务器与边缘服务器, 将优化设备接入到系统电源电路中, 完成系统硬件的优化; 采集 5G 通信链路实时数据, 利用云边协同技术计算链路负载量, 判断链路是否存在负载拥塞现象; 根据负载状态检测结果, 计算 5G 通信链路均衡负载控制量, 在 MQTT 协议约束下实现 5G 通信链路均衡负载控制; 通过系统测试实验得出结论: 与传统控制系统相比, 在优化设计控制系统作用下, 5G 通信链路的负载抖动量降低了 13.95%, 有效降低通信时延并提高链路利用率, 证明优化设计系统具有良好的控制功能和效果。

关键词: 云边协同; 5G 通信; 链路均衡负载; 负载控制系统

5G Communication Link Balancing Load Control System Based on Cloud Edge Collaboration

LIU Li

(Sichuan Zhongyi Communication Technology Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In 5G communication networks, there is a high link density and a large amount of transmitted data, which can easily lead to load imbalance and congestion. To improve the balance between links in 5G communication networks, a 5G communication link balance load control system based on cloud edge collaboration is designed. Modify the link data collector, processor, switch, and load controller, add cloud servers and edge servers, connect the optimized equipment to the system power circuit, and complete the optimization of the system hardware. Collect the real-time data of 5G communication links, use the cloud edge collaboration technology to calculate the link load and determine whether there is load congestion in the link. Based on load status detection results, calculate the balanced load control amount of 5G communication link, and achieve the 5G communication link balanced load control under the MQTT protocol constraints. Through system testing experiments, it was concluded that compared with traditional control systems, the 5G communication link load jitter of the optimized system was reduced by 13.95%, effectively reducing communication delay and improving link utilization, proving that the optimized system has good control functions and effects.

Keywords: cloud edge collaboration; 5G communication; link balancing load; load control system

0 引言

5G 通信系统具备更高的传输速率、更低的延迟和更好的网络容量, 为人们提供了丰富多样的通信服务和创新的应用场景。5G 通信网络所承载的服务将打破传统服务的限制, 涌现出一系列全新的应用, 如: 触感互联网、高清视频流、远程医疗、智能交通、实时控制等。5G 网络相对于 4G 而言, 可以实现较高的数据传输率, 同时也可以实现较低的服务延迟, 提高能耗效率。因此, 5G 核心网将重点放在提高网络容量、支撑多种多媒体业务、促进业务落地与创新等方面。5G 网络的网络性能不断提高, 对网络的资源调度提出了更高的要求。在 5G 通信网络的负载均衡是保证 5G 网络运行效率与服务质量的基础, 也是当前 5G 核心网研究的重点。

5G 通信网络环境中, 无负载均衡对 5G 通信网络负载进行调度与控制, 通信链路极易出现拥塞现象, 不仅增加网络的通信时延, 还加大了通信数据丢失的概率。负载均衡是将网络流量平均地分配到多台 PC 和通信链路上, 使得网络中的负载处于一个相对均衡的状态, 从而确保通信链路在 5G 通信网络请求较大的情况下, 可以实现响应时间短, 并实现最大的吞吐量。因此, 设计一种高效的 5G 通信链路均衡负载控制系统尤为重要。

文献 [1] 提出基于流分类的网络负载均衡系统, 以实现拥塞感知为前提, 对流量特性进行分析, 采取差异化策略, 为大、小流量进行链路负载分配, 从而达到网络流量特性和链路选择方法优势之间的最佳匹配。文献 [2] 提出基于改进拉格朗日松弛算法的网络负载均衡系统, 以链路

收稿日期: 2023-10-23; 修回日期: 2023-11-24。

作者简介: 刘 礼 (1983-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 刘 礼. 基于云边协同的 5G 通信链路均衡负载控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 111-116, 123.

时延、可用带宽和丢包率为约束建立路由模型，并采用改进的拉格朗日松弛算法进行路径选择。文献 [3] 提出软件定义无线网络的负载均衡系统，在充分考虑终端带宽、当前接入点负荷以及当前接入点接收信号的情况下，通过定期检测通信链路节点负荷状况，并将超负荷接入点下的候选接入点重新关联到轻负荷接入点，实现整体控制系统下的接入点均衡。上述传统链路均衡负载控制系统在 5G 通信网络环境中，存在明显的控制不佳的问题，具体体现在链路均衡负载偏差大等方面，为此引入云边协同技术。

云边协同技术是指云计算与边缘计算相结合，致力于实现云端和边缘设备之间的高效协同工作和资源共享。它的核心目标是解决边缘设备计算能力有限、存储容量受限以及网络带宽有限等挑战，同时提供低延迟、高带宽和高可靠性的服务体验，云边协同技术融合了云计算和边缘计算两个部分，云计算是一种分布式计算，它是将海量的数据处理任务，利用互联网“云”将其分解为若干小型程序，由多个服务器构成的系统对这些小型程序进行处理、分析，从而获得相应的结果，并将其反馈给用户。边缘计算是将网络、计算、存储和应用等核心能力整合到一起，在目标或数据源附近，为目标用户提供最接近目标的一方，实现对目标的实时处理。云边协同技术具有降低成本、提高响应速度、节省时间等特点，将该技术应用到 5G 通信链路均衡负载控制系统的优化设计工作中，以期能够提升 5G 通信链路的均衡负载控制效果。

1 5G 通信链路均衡负载控制系统总体结构设计

5G 通信链路均衡负载控制系统设计包括硬件和软件两部分，系统硬件包括 5G 通信链路数据采集器、5G 通信链路数据处理器、云端服务器与边缘服务器、交换机、链路均衡负载控制器；系统软件通过 5G 通信链路实时数据采集，获取通信链路的负载情况；利用云边协同技术，对采集的实时数据进行处理和分析，计算链路的负载量；根据计算出的链路负载量，判断链路是否存在负载拥塞现象；根据负载状态检测结果，计算 5G 通信链路的均衡负载控制量；在 MQTT 协议约束下，根据计算出的均衡负载控制量，实施 5G 通信链路均衡负载控制。5G 通信链路均衡负载控制系统的总体结构框如图 1 所示。

根据图 1 所示的系统总体结构，分别对系统硬件及软件做出详细设计。

2 5G 通信链路均衡负载控制系统硬件设计

负载均衡是与 5G 通信网络中的流量控制有关的一个概念，当网络中有很大的冗余时，在两个终端节点之间传输的流量可以有很多种选择，因此，如何利用调度与控制方式，让流量负载可以在整个网络中均匀地分布，从而使整个网络的资源利用率达到最大，这就是负载均衡问题。在此次研究中分别从硬件和软件两个方面优化 5G 通信链路均衡负载控制系统，系统硬件设计的目的是为负载控制软件的实现提供硬件支持，同时满足云边协同技术的运行条件。

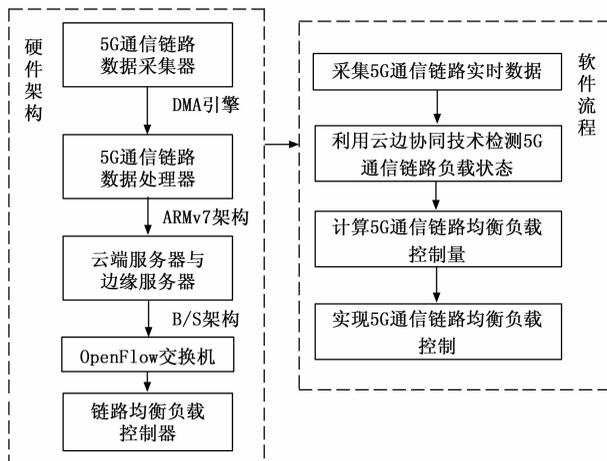


图 1 5G 通信链路均衡负载控制系统的总体结构框图

2.1 5G 通信链路数据采集器

数据采集器装设的目的是及时获取 5G 通信链路中的流量数据，为通信链路负载的度量提供数据支持。而数据采集器优化的目的，是保证采集的通信网络数据正确性与实时性。优化设计的 5G 通信链路数据采集器采用 ASIC+FP-GA 架构，优化后的采集器内部结构如图 2 所示。

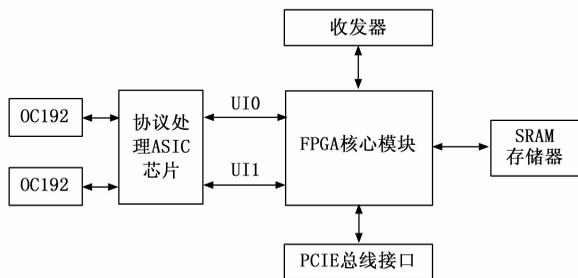


图 2 通信链路数据采集器内部结构图

从图 2 中可以看出，优化设计的 5G 通信链路数据采集器由 SRAM 存储模块、FPGA 处理模块、外设总线接口等部分组成。通信网络流量数据经过两路万兆速率的信号收发器，进入到采集器中，完成模拟信号与电信号的转换，之后再交给 ASIC 芯片进行物理层和数据链路层协议处理。通过 XAUI 总线将数据包发送给 FPGA，FPGA 按照预先设定的规则对接收到的报文进行分组，并通过 DMA 引擎把报文传送到处理器中。

2.2 5G 通信链路数据处理器

优化设计系统中选用 Cortex-M3 型号的处理器的执行流量数据处理工作的执行装置，该处理器采用 ARMv7 架构，以哈佛结构的三级流水线内核，具有两条独立的总线，能够保证对指针的存取和对指针的存取不发生冲突。从组成结构上看，该处理器主要包括译码器、ALU 以及连接处理器其他部件的接口^[4]。其中，译码器既可支持常规 Thumb 指令，又可支持新型 Thumb-2 指令，ALU 可支持硬件相乘、相除等功能。在传统数据处理器的基础上，内置一个通用寄存器装置，用来扩展处理器的存储空间。

2.3 云端服务器与边缘服务器

为满足云边协同技术运行对硬件设备与环境的要求，需要在控制系统中加设云端服务器和边缘服务器，云端服务器主要承担着系统的全局管理、部分业务逻辑以及计算存储支持的功能，在优化设计控制系统中，使用 B/S 架构，也就是浏览器和服务器的架构，对云计算服务器进行开发，将开发的 Web 应用部署到云平台上，并利用其运算能力和存储能力，对系统运行过程中的数据进行处理和存储^[5]。另外，系统中的边缘服务器选择树莓派 4B 作为载体，可以利用 USB 通信、网口通信来完成应用通信和开发，与此同时，还可以利用 GPIO 引脚来实现对底层硬件的控制，满足控制系统对边缘端的开发要求^[6]。最终将控制系统中加设的服务器设备按照图 3 表示的方式进行连接。

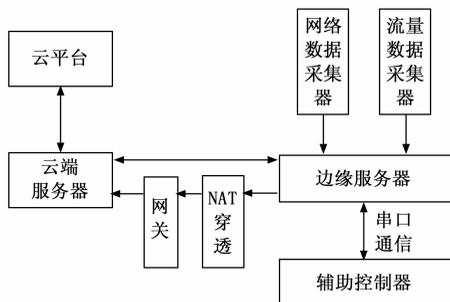


图 3 云端服务器与边缘服务器的连接结构图

在控制系统实际运行过程中，边缘服务器对 5G 通信链路路上的传感数据进行读取，并发送传输指令给控制器，由边缘服务器驱动通信链路状态的切换，并将实时运行数据通过边缘服务器上传给云端^[7]。云端服务器接收到数据后，对 5G 通信网络环境中的所有链路状态进行评估与规划，完成对 5G 通信网络环境的监测与控制。

2.4 交换机

根据 5G 通信链路负载的均衡控制要求，要求交换机在 100 Mbps 以太网链路上支持 16 台 AFDX 终端的全双工、无阻塞的数据交换^[8]。为满足上述要求，选择 OpenFlow 交换机替换传统控制系统中的交换机设备，优化交换机的硬件组成情况如图 4 所示。

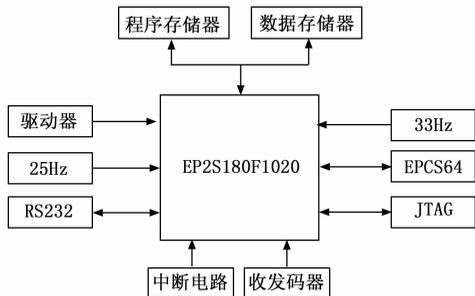


图 4 交换机硬件组成图

OpenFlow 交换机的主要构成一部分为流表，另一部分则是安全通道，这两部分都是按照交换逻辑所需要的逻辑单元规模来设计的，内部有 EP2S180 芯片，在控制器和交

换机之间的数据能够以 SSL 为基础，通过安全通道来安全地传输^[9]。当数据包抵达 OpenFlow 交换机的时候，首先要做的是寻找流表，如果有与之匹配的流表，那么就会做对应的动作，如果没有，那么就会给控制器发送一个 PacketIn 消息，控制器会对此作出响应，然后进行对应的动作。

2.5 链路均衡负载控制器

链路均衡负载控制器是 5G 通信链路均衡负载控制系统控制任务的执行元件，控制器性能直接决定了系统控制任务的执行效果。图 5 为优化设计系统中链路均衡负载控制器的内部组成结构。

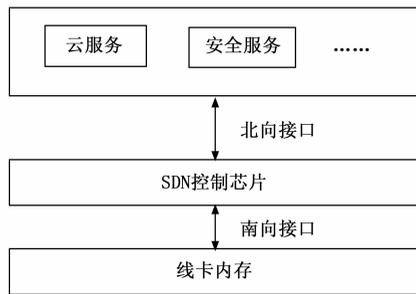


图 5 链路均衡负载控制器内部结构图

从图 5 中可以看出，优化设计系统中使用的控制器为 SDN 控制器，该控制器采用层次化结构，由北向接口、核心功能模型和南向接口等组成部分。北向接口与上层的应用程序提供交互，使更高层次的应用程序能够通过它获得 5G 通信网络信息，并发出指示。核心功能模块具体包含了以下内容：网络设备发现、网络拓扑维护、信息管理和状态转移等。另外，南向接口主要是与开关进行连接，并通过流表化的形式将网络调节信息传递给交换机^[10]。在实际的 5G 通信链路均衡负载控制系统运行过程中，将 5G 通信链路的实时运行数据通过北向接口输入到控制器中，通过核心功能模型对输入数据的分析，生成相应的链路均衡负载控制指令，并通过南向接口输出。

根据上述控制系统硬件中各元件设备的改装与加设结果，对系统电路的连接方式进行调整，将优化后的硬件设备连接到系统电路中，保证对所有硬件设备的正常供电。

3 5G 通信链路均衡负载控制系统软件设计

优化设计的 5G 通信链路均衡负载控制系统以平衡 5G 通信网络中所有链路的负载作为控制目的，在系统硬件的支持下执行控制任务。为实现对 5G 通信链路均衡负载的精准控制，在云边协同技术的支持下，对各通信链路的负载情况进行检测，在考虑链路容量的情况下，计算通信链路之间的负载偏差，从而得出链路负载的控制量，最终采用负载调度、链路接入、队列管理等方式，完成系统的 5G 通信链路均衡负载控制功能。

3.1 采集 5G 通信链路实时数据

5G 通信网络中任意链路可以以模型形式表示，模型表达式如下：

$$\begin{cases} L(t) = L_{\text{real part}}(t) + L_{\text{imaginary part}}(t) \\ L_{\text{real part}}(t) = A(t)\cos\varphi(t) + m_z(t) \\ L_{\text{imaginary part}}(t) = A(t)\sin\varphi(t) + m_d(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L_{\text{real part}}(t)$ 和 $L_{\text{imaginary part}}(t)$ 分别为 5G 通信链路中的实部与虚部, $A(t)$ 和 $\varphi(t)$ 为 5G 通信链路中信号的幅值和相位值, $m_z(t)$ 和 $m_d(t)$ 分别为 5G 通信链路中的噪声部分和窄带高斯部分^[11]。5G 通信链路受到环境因素的影响, 存在衰落特征, 链路衰落特征可以量化描述为:

$$\kappa_{\text{fading}}(t) = \sqrt{\kappa_{\text{large scale}}(t)} \times \kappa_{\text{small scale}}(t) \quad (2)$$

式中, $\kappa_{\text{large scale}}(t)$ 和 $\kappa_{\text{small scale}}(t)$ 分别为通信链路的大尺度衰落系数和小尺度衰落系数, 大尺度衰落系数体现了与距离、频率相关的路径损耗和阴影衰落, 小尺度衰落则是多径效应和多普勒效应两者共同作用的结果^[12]。根据 5G 通信网络及链路的分布结构, 将 5G 通信网络系统硬件中的数据采集器安装在各个链路中, 利用采集器设备对流量数据进行采集, 设置数据采集频率为 f_c , 那么 5G 通信链路实时数据的采集结果为:

$$x(t) = L(t) \times \kappa_{\text{fading}}(t) \times \kappa_{\text{gather}} \times f_c \quad (3)$$

式中, κ_{gather} 为 5G 通信链路数据的采集系数, 该参数的具体取值由系统硬件中安装的采集器设备决定。将公式 (1) (2) 的计算结果代入公式 (3) 中, 即可得出 t 时刻 5G 通信链路中流量数据的采集结果, 按照上述方式可以得出 5G 通信网络运行状态下任意链路在所有时刻的流量数据采集结果^[13]。在数据采集过程中需要注意的是, 不同链路的衰落特征存在差异, 因此获取的流量数据存在相应差异。

3.2 利用云边协同技术检测 5G 通信链路负载状态

云边协同技术由边缘网关集群和云服务器共同完成, 将边缘网关接收的实时节点数据交由云服务器进行最后处理以及历史数据的管理, 实时数据即传感节点数据产生即上传, 云服务器接收到传感节点数据后, 将历史数据写入云服务器文件, 便于管理用户对传感节点的工作状态进行查看^[14]。同时, 云边交互层还需要维护云服务器和边界网关之间的 API 接口, 也就是边界网关接取和边界网关之间的数据流信息, 边界网关接入云服务器 API 请求服务, 边界网关在相应的 API 接口上作出相应的响应, 最终实现边界网关的服务获取。在云边网络的初始化阶段, 云服务器需对新接入的边缘网关经 API 端口进行身份认证, 并将认证信息写入到云服务器的文件中, 才能确保上层网络的整体安全。云边协同技术原理如图 6 所示。

云边协同技术主要体现在数据协同、业务协同、运营协同和服务协同 4 个方面, 边缘设备数据由终端设备采集后上传到边缘节点, 边缘节点通过数据预处理可以过滤掉大量冗余或无效数据, 筛选出与业务关联的关键数据, 根据需要上传到云中心节点, 可以有效减少网络带宽、存储资源和计算资源的消耗^[15]。云中心节点获取关键数据后进一步分析, 通过云端部署的智能应用完成复杂业务场景需求。5G 网络中的链路数据由边缘生成, 通过将服务应用有选择地部署到边缘节点, 从而提高用户对 5G 网络的响应体

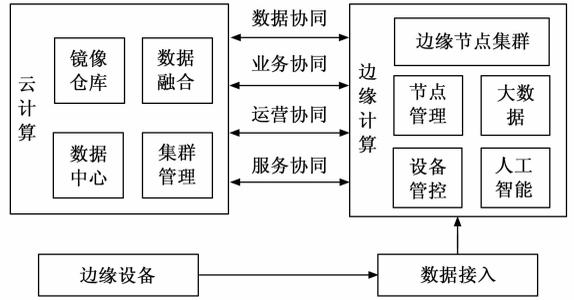


图 6 云边协同技术原理图

验, 并将终端数据存储到边缘节点中, 从而提高 5G 网络的性能。云中心起到了控制中心的作用, 对各节点的状态、配置, 属性等数据进行了有效管理。一方面, 要实现云端边缘节点的统一控制, 就必须将以上的数据或部分数据在云端边缘进行同步。在数据同步过程中, 需要兼顾数据的安全性和用户的隐私保护。另一方面, 可以在边端存储数据, 并在云计算中随心所欲地访问。此外, 在部署集群的时候, 还需要考虑到网络的问题。在云边的网络出现抖动或出现故障的时候, 数据发送方应该将发送的数据缓冲起来, 等到网络恢复之后再继续发送^[16]。此外, 还需要对收到的信息进行验证, 以避免消耗重复的信息占据资源, 因此可以使用 ACK 机制来完成信息的同步确认。在云边群体体系结构中, 其核心节点往往与多个边缘节点相连, 而这些边缘节点所处的业务环境往往是不一样的。云中心通过对边缘数据的采集和汇聚, 实现跨区域、跨系统的多维度时空数据的融合和协同分析, 实现对边缘数据的一体化控制。在云边协同技术的支持下, 同步获取 5G 通信链路数据, 由此计算通信链路中的负载量, 负载量的计算公式如下:

$$F_i = n_{\text{node}}\kappa_c x(t) \quad (4)$$

式中, n_{node} 为通信链路中包含的节点数量, κ_c 为云边协同系数, 将实时采集的通信链路流量数据代入公式 (4) 中, 即可得出链路负载量的计算结果。综合考虑 5G 通信链路容量, 即可得出当前链路负载程度的检测结果, 负载程度的计算公式为:

$$\mu = \frac{F_i}{C_i} \quad (5)$$

式中, C_i 为第 i 条通信链路的容量值, 该参数的具体取值可通过公式 (6) 计算得出:

$$C_i = y_{\text{det}}[\mathbf{W}(i) + B(i)] \quad (6)$$

式中, $\mathbf{W}(i)$ 和 $B(i)$ 分别为通信链路的单位矩阵和带宽值, $y_{\text{det}}(\cdot)$ 为矩阵行列式函数。通过公式 (5) 和公式 (6) 的联立, 即可得出 5G 通信链路负载程度的检测结果, 若计算得出 μ 的值高于预设阈值 μ_0 , 则说明当前链路存在负载拥塞现象, 否则认为当前链路无异常拥塞, 同理可以得出 5G 通信网络中所有链路负载状态的检测结果。

3.3 计算 5G 通信链路均衡负载控制量

获取 5G 通信链路负载状态后, 首先对存在负载拥塞的链路进行调度控制, 缓解链路的拥塞程度, 将其恢复至正

常运行状态，在此基础上，控制 5G 通信网络中的所有链路负载程度相同^[17]。根据上述控制目的，根据 5G 通信链路负载状态的检测结果，分两个步骤计算 5G 通信链路的均衡负载控制量，5G 通信链路拥塞负载的控制量为：

$$\Delta F_{\text{jam}}(i) = \begin{cases} (\mu - \mu_0)C_i, \mu \geq \mu_0 \\ 0, \mu < \mu_0 \end{cases} \quad (7)$$

从公式 (7) 中可以看出，若当前通信链路存在负载拥塞现象，则负载的控制目标即为负载拥塞负载的临界状态，若当前链路未出现负载拥塞现象，则无需执行拥塞负载控制任务^[18]。在此基础上，计算 5G 通信环境中所有链路负载的平均值，以此作为链路均衡负载的控制目标，具体计算公式如下：

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} F_i}{\Delta F_{\text{jam}}(i)n_i} \quad (8)$$

式中， n_i 为 5G 通信网络中包含的链路数量，在实际的链路均衡负载控制目标计算过程中，存在负载拥塞的链路以负载临界值作为计算数据。那么 5G 通信链路负载均衡控制量的计算结果为：

$$\Delta F_{\text{balanced}}(i) = F_i - \bar{F} \quad (9)$$

任意通信链路的负载总控制量为：

$$\Delta F = \Delta F_{\text{balanced}}(i) + \Delta F_{\text{jam}}(i) \quad (10)$$

在实际控制过程中需要考虑链路负载的正负情况，若总控制量取值为负，则需要将其他链路的负载添加到当前链路中，否则需要将当前链路的负载调度到其他链路中。

3.4 实现 5G 通信链路均衡负载控制

针对存在负载偏差以及负载拥塞的链路进行负载调度，根据控制量的计算结果，在 5G 通信网络中选择满足调度条件的链路集合。为满足云边协同技术的运行要求，同时为 5G 通信链路均衡负载控制功能的运行提供约束，选择 MQTT 协议作为云边协同和负载均衡控制过程中的通信协议。MQTT 协议如图 7 所示。

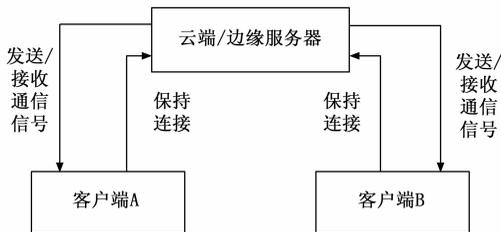


图 7 MQTT 协议示意图

利用公式 (11) 对两链路之间的距离进行度量。

$$d(i, j) = \frac{\sqrt{(l_i - l_j)^2}}{\Delta F} \quad (11)$$

式中， l_i 为当前负载控制链路， l_j 为满足调度要求的链路。选择 $d(i, j)$ 取值最小的通信链路作为目标调度链路，将计算的负载控制量切入目标链路中，完成系统的链路均衡负载控制操作^[19]。在系统运行过程中，根据负载状态和负载偏差的检测结果作为系统控制程序的启动条件，若检测到链

路中无负载拥塞，且负载偏差在允许范围内，则停止系统控制程序的运行。

4 系统测试

以测试优化设计的基于云边协同的 5G 通信链路均衡负载控制系统的负载控制功能作为实验目的，设计系统测试实验。此次系统测试实验的基本思路为：在 5G 通信网络中设置多个存在负载拥塞的链路，并通过传输任务的设置，保证通信网络中链路之间存在明显偏差现象，在实验环境下实现优化设计系统硬件和软件部分的开发，并将布设的 5G 通信链路接入到控制系统中，得出相应的均衡负载控制结果。在控制任务执行结果后，对 5G 通信网络链路性能进行测度，得出反映系统控制功能的测试结果。

4.1 布设 5G 通信网络环境

此次实验选择某市办公楼中的 5G 通信网络作为系统测试背景，5G 通信网络包含 200 个通信节点和 5 个 5G 通信基站，移动用户终端在办公楼中均匀布置。5G 通信网络的区域覆盖半径为 2 000 m，基站功率和用户节点功率分别为 80 dBm 和 20 dBm。通过 5G 通信网络中部分节点的相互连接，生成 120 条通信链路，基站与用户节点形成链路的带宽为 300 MHz，普通用户节点之间形成链路的带宽为 200 MHz，5G 通信网络环境中所有链路的路径损耗均为 140。利用 ns-3 工具对 5G 通信网络进行开源配置，ns-3 工具的整体组织结构都在一个名为 src 的目录下实现。在这个目录中，从上至下的每一个模组都只对其最下面的模组负责，即底层模块是为上层模块服务的^[20]。使用 ns-3 工具来配置 5G 通信网络的内核模块和网络模块，内核模块属于一种通用模块，它适用于现在的所有硬件、协议以及场景模型，在 src/core 目录下可以查看内核模块的源代码。数据包是网络中最基本的传输单位，数据包的描述在网络模拟中是必不可少的，数据包的源码可以在 src/Network 目录中找到，实现了核心和网络模块的配置，目的是为网络提供通用的服务。

4.2 设定 5G 通信链路状态

准备通信数据将其随机导入到布设 5G 通信网络的各个节点位置上，设置通信数据的传输目标节点，通过通信传输任务与传输队列的生成，完成初始 5G 通信网络状态的设定。图 8 表示的是部分 5G 通信链路初始状态的设定结果。

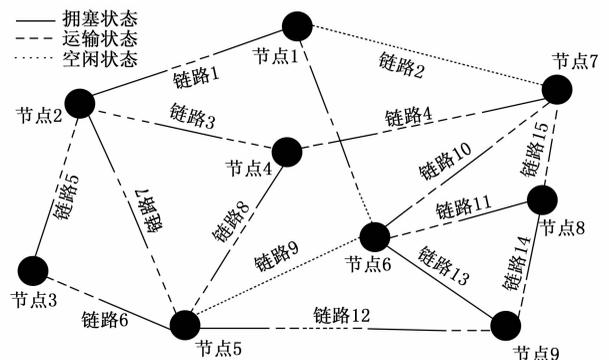


图 8 5G 通信链路初始状态示意图

按照上述方式可以完成布设的 5G 通信网络环境中，所有通信链路初始状态的设定，从图 8 中可以看出，5G 通信网络环境中的链路状态存在拥塞、运输和空闲 3 种形式，且处于拥塞状态通信链路数量更多。

4.3 描述系统测试实验过程

在硬件设备安装并调试成功后，利用编程工具完成基于云边协同的 5G 通信链路均衡负载控制系统软件程序的开发，并将安装的硬件设备接入到软件运行程序中。通过链路负载状态检测、控制量计算等步骤，完成系统的链路均衡负载控制任务。图 9 为优化设计 5G 通信链路均衡负载控制系统的运行界面。

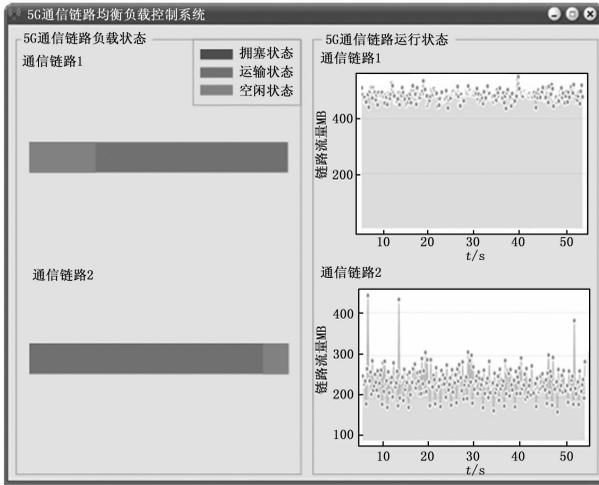


图 9 5G 通信链路均衡负载控制系统运行界面

使用 SmartBits 200 作为测试工具。可以帮助用户测试：网络设备的性能，如吞吐量、延迟、丢包率等指标，也可以在一个端口中模拟上千万个网络的数量，对其各自的性能展开分析，测试链路下的流量表现，从而获得控制系统作用下 5G 通信链路的测试数据。此次系统测试实验设置了传统的基于流分类的网络负载均衡系统和基于改进拉格朗日松弛算法的网络负载均衡系统作为实验的对比系统，在相同的实验环境下完成对比系统的开发与运行，并输出相应的通信链路均衡负载控制结果数据。

4.4 设置系统测试指标

此次系统测试实验选择负载抖动作为系统负载控制功能的量化指标，通信时延和链路利用率作为系统控制效果的测试指标，其中负载抖动指标的数值结果为：

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |F_{\text{control}}(i) - \bar{F}|}{n_i} \quad (12)$$

式中， $F_{\text{control}}(i)$ 为控制系统作用下第 i 个通信链路的实际负载值。另外通信时延和链路利用率的计算公式如下：

$$\begin{cases} \tau = t_{\text{receive}} - t_{\text{send}} \\ \eta_{\text{utilize}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{C_i}\right)}{n_i} \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

式中， t_{send} 和 t_{receive} 分别为通信数据的发送与接收时间， Z_i 和 C_i 分别为第 i 个通信链路的实际占用量和链路容量。最终计算得出负载抖动值越小，证明对应系统的负载均衡控制功能越优，通信时延越大、链路利用率越小，说明对应系统的控制效果越好。

4.5 系统测试实验结果与分析

在不同链路均衡负载控制系统作用下，获取 5G 通信网络中各链路的实际负载数据，由此反映系统的控制功能，测试结果如表 1 所示。

表 1 系统负载均衡控制功能测试数据表

5G 通信链路编号	基于流分类的网络负载均衡系统作用下的链路负载值/Mbps	基于改进拉格朗日松弛算法的网络负载均衡系统作用下的链路负载值/Mbps	基于云边协同的 5G 通信链路均衡负载控制系统作用下的链路负载值/Mbps
1	106	146	131
2	155	158	130
3	159	183	133
4	193	112	132
5	112	130	132
6	156	144	132
7	154	143	131
8	155	145	133
9	149	138	132
10	183	139	132

将表 1 中的数据代入到公式 (12) 中，计算得出 3 种控制系统作用下，5G 通信链路的负载抖动值为 17.9、11.4 和 0.7 Mbps。在控制系统作用下，提取 5G 通信链路的运行数据，通过公式 (13) 的计算，得出通信时延和链路利用率指标的测试结果，如图 10 所示。

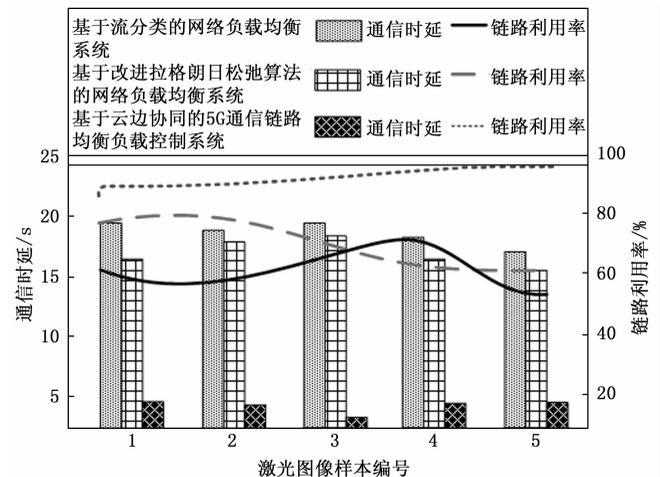


图 10 通信链路时延和利用率测试对比结果

从图 10 中可以直观看出，与两种对比系统相比，在优化设计系统的控制作用下，5G 通信链路的通信时延更短，能够控制在 5 s 以下，同时链路利用率更高，能够控制在 80% 以上。

(下转第 123 页)