

基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统设计

周 磊

(国网宁夏电力有限公司 吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751100)

摘要: 5G 通信使用的是毫米波频段, 相比于低频段而言, 信号在传播中更容易受到信道干扰及多路径衰落的影响, 导致 5G 通信信道拥塞概率与数据丢失概率较高, 为此, 设计并开发了基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统; 改装通信信道数据采集器、处理器、交换机合路器、均衡器以及控制器等元件, 将其接入到系统电路中, 实现系统硬件的优化; 利用采集器设备, 以动态方式采集 5G 通信信道传输数据, 从时域和频域两个方面提取信道传输特征, 综合特征匹配度和信道占用率两个方面, 判断当前通信信道的运行状态; 针对处于拥塞状态的信道, 在传输控制协议的约束下, 利用云计算技术实现 5G 通信信道传输任务的调度, 最终通过通信信道增强、干扰消除两个步骤, 实现系统的 5G 通信信道传输控制功能; 实验结果表明, 有干扰场景下, 所设计系统的信道传输平均误码率为 0.22%, 信道传输数据丢包率的平均值为 0.48%, 5G 通信信道的平均数据传输速度为 406 GB/min。

关键词: 云计算; 5G 通信; 通信信道; 传输控制

Design of 5G Communication Channel Transmission Control System Based on Cloud Computing

ZHOU Lei

(Wuzhong Power Supply Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Wuzhong 751100, China)

Abstract: 5G communication technology uses millimeter wave frequency band, and compared to low frequency band, 5G signals are more susceptible to channel interference and multi path fading during propagation, resulting in a higher probability of congestion and data loss in the 5G communication channel. Therefore, a 5G communication channel transmission control system based on cloud computing is designed and developed. Modify the communication channel data collector, processor, switch combiner, equalizer, and controller, and integrate them into the system circuit to achieve the optimization of the hardware system. Use the collector equipment, dynamically collect the 5G communication channel transmission data, extract the channel transmission features from both time-domain and frequency-domain aspects, and comprehensively evaluate the current operating status of the communication channel based on the feature matching degree and channel occupancy rate. For the congested channels, cloud computing technology is used to schedule the 5G communication channel transmission task under the constraints of transmission control protocols. Finally, the system's 5G communication channel transmission control function is achieved through two steps: communication channel enhancement and interference elimination. Experimental results show that under the interference scenarios, the average bit error rate of the designed system's channel transmission is 0.22%, the average data packet loss rate of the channel transmission is 0.48%, and the average data transmission speed of the 5G communication channel is 406 GB/min.

Keywords: cloud computing; 5G communication; communication channel; transmission control

0 引言

5G 是新一代高速、低延迟、大带宽的宽带通信技术, 是实现人与物之间信息交互的重要网络基础。5G 以其高速、低延迟和大容量的特点, 为人们带来了更加强大和全面的无线网络体验。通信信道是完成 5G 通信任务的重要环境, 信道传输是指在信号从发送端到接收端的传播过程中经历的信号衰落、干扰和损耗等影响因素。这些因素可能导致传输中的错误和丢包, 从而降低通信质量和性能。首先, 5G 通信频段中使用的毫米波频谱相对较高, 传播路径的特性与之前的低频段有所不同。毫米波信号更易受多路

径衰落、信号干扰和天气条件的影响, 导致传输时出现较高的误码率和丢包率。其次, 信道干扰也是 5G 通信中一个重要的挑战。由于毫米波频段与障碍物的交互作用更加显著, 如建筑物、树木等, 信道干扰进一步增加了传输中的错误和丢包风险。此外, 高频传输还会导致信号经过传播时经历更高的损耗, 从而降低信噪比, 进一步增加误码率和丢包率。受到同频干扰、邻道干扰和互调干扰, 5G 通信信道在实际数据传输任务中, 极易出现传输拥塞、数据传输错误等现象, 为此, 当前相关领域学者纷纷设计并开发了 5G 通信信道传输控制系统。

文献 [1] 提出基于深度增强学习与子流耦合感知的传

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-10-25。

作者简介: 周 磊 (1986-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 周 磊. 基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 125-131, 138.

输控制系统,采用小波降噪方法,在子流单向传递延迟中,去除不耦合路段和系统所引起的随机噪声,并根据子流相互关联系数,提取子流耦合特征;然后,基于深度增强学习,建立多向 DQN 网络的多向传输控制模型,设计多向 DQN 网络的多向拥塞控制策略,实现了异构、动态网络环境下的智能多路拥塞控制。文献 [2] 提出基于自适应网络编码的传输控制系统,引入 Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C) 强化学习,通过自适应的网络编码,使其能够根据网络状态动态调整编码包的尺寸和冗余度,有效地解决了网络中的数据包乱序问题。文献 [3] 提出基于 FPGA 的传输控制系统,利用 HELLO 格式的 MSG 接口,对发射端进行了多个接口的设计,并在其内部引入了环路-罗盘过程,使得多路接口在同步传输时可以共享一个 SRIO 接口,从而达到了争夺式处理的目的;并以多个信道的形式进行封装,从而实现了接口数目和时钟范围的任意扩充。然而上述传统传输控制系统运行过程中,存在明显的控制功能差的问题,主要体现在数据传输误码率高、数据丢失量大以及信道拥塞等方面,为此引入云计算技术。

针对上述问题,设计基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统。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”将其分解为若干个小程序,由多个服务器构成的系统对这些小程序进行处理、分析,得出相应的结果,并将其反馈给用户。利用云计算技术,对 5G 通信信道传输控制系统进行优化设计,以期能够提高对信道传输进程的控制效果,间接地提升 5G 通信信道的传输效率。

1 5G 通信信道传输控制系统硬件设计

此次优化设计的通信信道传输控制系统,以 5G 通信信道及其传输任务作为控制对象,通过检测通信信道的实时状态以及与控制目标的比对,判断是否需要执行传输控制指令,使 5G 通信信道控制对象能够与预期控制目标保持高度一致^[2]。为实现上述控制任务,需要安装相应的硬件设备,为软件功能的执行与实现提供硬件支持。5G 通信信道传输控制系统硬件整体结构如图 1 所示。

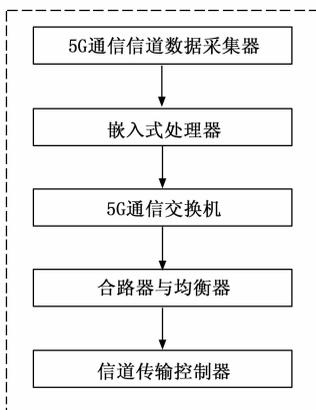


图 1 分布式控制系统执行机制详解图

如图 1 所示,首先,5G 通信信道数据采集器负责从通信信道中采集数据,然后将采集的数据传输到嵌入式处理器。嵌入式处理器对接收到的数据进行处理和分析,并将处理后的数据通过 5G 通信交换机传输到合路器与均衡器。合路器与均衡器对接收到的数据进行合路和均衡处理,以优化信道传输的质量。最后,信道传输控制器对处理后的数据进行进一步的控制和管理,以确保信道传输的稳定性和可靠性。上述硬件结构使得 5G 通信信道传输控制系统能够高效地处理和管理数据,从而提高了通信系统的性能和稳定性。

1.1 5G 通信信道数据采集器

5G 通信数据采集器的工作内容是获取通信数据中的实时传输数据信息,为信道状态的判定提供数据支持。为适应 5G 通信信道传输环境,同时针对现有数据采集器在工作效率方面存在的问题,需要对数据采集器进行改装,改装后的 5G 通信数据采集器内部结构如图 2 所示。

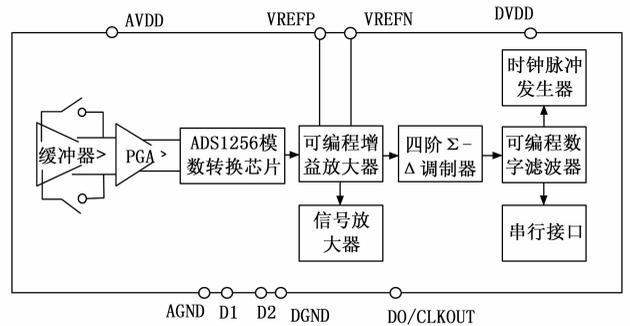


图 2 5G 通信数据采集器内部结构图

优化设计系统选择的是 24 位 Sigma-Delta 型 ADS1256 模数转换芯片,它是 5G 通信数据采集器的核心芯片。5G 通信数据采集器由多路开关、输入缓冲器、SPI 接口等部分构成。ADS1256 内部提供了一个标准的 SPI 从设备串行数字接口,MCU 通过 SPI 接口将命令字传递到 ADC 内部寄存器,来对 ADC 的各项操作进行控制。由于 5G 通信系统中主要功率单元的功率放大率已经被初步设定,所以在 5G 通信系统中,满足发送要求的信号参数的功率放大率不可为“1”。从功能上来说,通信信号采集模块的功能就像是一个本地的通信行为控制设备,它可以在核心控制主机的作用下,对发送信号中的有用元素进行筛选,并将其临时存储到系统数据库主机中^[3]。

1.2 嵌入式处理器

在系统中安装嵌入式处理器的作用是对采集器输出的通信数据的分析、处理工作提供环境,同时也是云计算技术的运行环境。为满足云计算技术对硬件运行环境的要求,在传统处理器的基础上,对其进行优化。优化后的嵌入式处理器使用 LT2440 和 S3C2440A 作为联合处理芯片,S3C2440A 集成了丰富的片上资源。利用 ASCLL 器件,将以数据包的形式输出的信号参数再一次地反馈到其他的硬件连接结构^[4]。嵌入式处理器结构组成如图 3 所示。

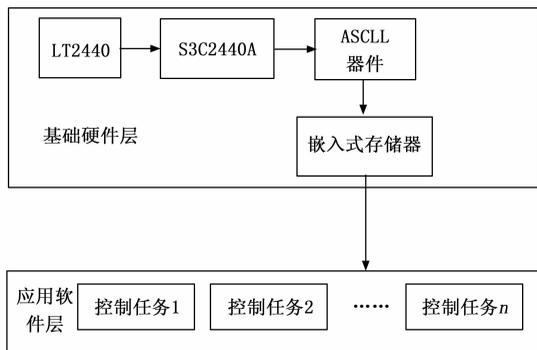


图 3 嵌入式软 PLC 分布式控制系统结构组成图

使用 LT2440 和 S3C2440A 作为联合处理芯片，可以充分发挥 S3C2440A 集成的丰富片上资源。S3C2440A 是一款高性能的 ARM920T 内核微处理器，具有强大的处理能力和丰富的外设接口。通过将 ASCLL 器件与这种组合芯片配合使用，可以将以数据包形式输出的信号参数再次反馈到嵌入式存储器中。这种反馈机制可以进一步优化系统软件信号传输和处理的效果，从而更好地满足系统的需求。

1.3 5G 通信交换机

为了达到对 5G 通信通道传输率的控制目的，在原有的通信网交换机中，植入交换芯片，并用传统的芯片取代了 IA200 开关芯片^[5]。将交换芯片嵌入到交换机内，使其具有云计算处理能力，极大地提高了传统交换机的灵活性。交换芯片组成结构如图 4 所示。

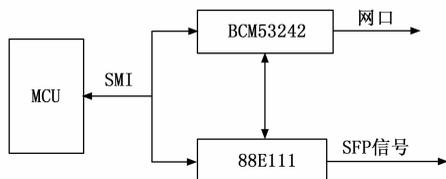


图 4 交换芯片组成结构图

考虑到 100 M 的网络端口和 1 000 M 的网络端口，选用 BCM53242 作为交换机。在 5G 通信交换机运行过程中，该交换机芯片使用 IEEE802.3，实现 8 个千兆比特端口之间的 MAC 层数据交换。这个过程由两部分组成：学习与转发。在接收到 MAC 帧之后，交换机将提取 MAC 帧中对应的数据，然后在索引表中查找对应的条目。在此基础上，由交换机芯片产生一个地址指数，并决定了主机和端口的对应关系。在转发时，交换机芯片在接收到 MAC 帧的请求后，从 MAC 帧中提取出目的地址，然后在 MAC 地址列表中查找相应的结点。在此基础上，交换芯片可以根据所需的目的地址来获取所需的端口号，并向所需的端口发送 MAC 帧。

1.4 合路器与均衡器

合路器的主要功能是把输入的多频带的信号结合起来，然后再进行输出，经过优化设计的合路器包括了通信信道

数据接收模块、调度合路单元、填充通信信道数据生成模块和定界输出 4 个部分。合路器中采用了和链路控制器相同的调度策略。当它决定传输一条线路时，首先发出一个同步标志，并在 FIFO 中读出数据，从而完成对数据的定义和传输^[6]。在 4 个数据接收模块均无任何一个输出端发出“发送请求”信号的情况下，一个调度合并单元就会在 5G 通讯通道中填入一个数据字段的固定数据，以维持输出代码流的连续性。系统中安装的均衡器包括时域均衡器和线性均衡器，均衡器主要用来执行信道的调度工作，保证信道中传输数据的均衡性。系统中使用时域和线性均衡器的内部结构如图 5 所示。

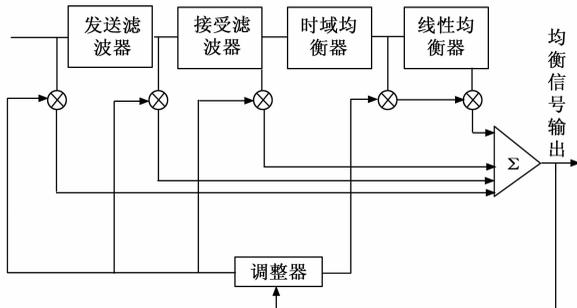


图 5 时域和线性均衡器连接结构图

优化设计的均衡器在接收滤波器与采样判决器之间，加入一个能对其进行修正或补偿的滤波器，使其达到平衡^[7]。利用均衡器生成的波形对已发生畸变的 5G 通信信道传输信号波形进行补偿，从而使该波形达到没有码间串音的目的。

1.5 信道传输控制器

信道传输控制器是系统传输控制功能的执行元件，由接收模块、调度模块、发送模块等部分组成，其工作原理如图 6 所示。

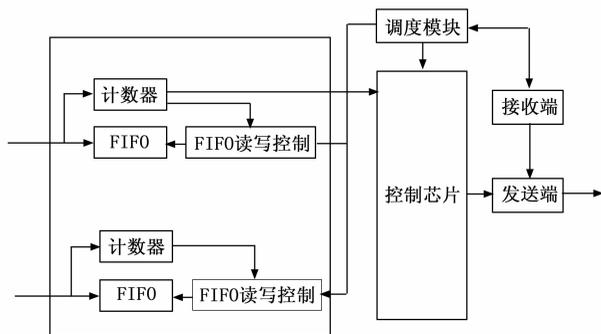


图 6 通信信道传输控制器工作原理图

接收模块中，主要包括 FIFO 和各种数据的接收计数器，该计数器的作用是对数据传输请求进行统计，并在传输许可有效的情况下，将收到的数据数量进行统计^[8]。在三通道实时遥感数据中，读取时钟的频率高于写入时钟的频率，而在延迟遥感数据中，二者的频率是一致的。接收

模块与调度模块的接口也使用了数据发送请求与允许发送的机制，在接收模块完成一次接收后，才向调度单元发出发送请求。根据系统中嵌入式处理器输出结果作为传输控制器的启动条件，进而输出通信信道传输控制指令。

2 5G 通信信道传输控制系统软件设计

在硬件设备的支持下，信道传输控制系统软件功能的实现原理为：通过对 5G 通信信道中实时传输数据的特征分析，判断当前通信信道的运行状态，若检测发现执行传输任务的通信信道存在拥塞现象，在云计算技术的支持下，选择当前 5G 通信环境中的最优信道作为调度目标，采用信道切换的方式，实现信道传输任务的调度，最大程度地降低由于信道拥塞而造成的传输时延与传输故障现象^[9]。在选择通信信道中，通过信道增强与干扰抑制，保证信道传输任务的执行效果，同时完成对传输速度的控制。根据上述系统软件功能的设计与实现过程，可以将 5G 通信信道传输控制任务分为传输质量控制和传输速度控制两部分。软件功能的实现以 5G 通信信道作为环境，因此在软件功能设计之前，首先需要对 5G 通信信道的基本工作方式进行分析，一般来讲，5G 通信信道环境中的信号在传输的过程存在起伏变化，且工作频率不固定，由此证明 5G 通信信道存在衰落现象，通过衰落深度的度量判断通信信号的衰落程度，衰落深度的度量公式如下：

$$h_t = 20 \lg \frac{E_r}{E_s} \quad (1)$$

式中， E_r 和 E_s 分别为通信信号接收端的电平值以及通信信道环境中的平均电平值。由此可以得出非控制状态下，5G 通信信道的工作过程为：

$$P_r = h_t | d | \psi_s(d) \psi_m(d) P_s \quad (2)$$

式中， d 为发送端与接收端之间的距离，也就是 5G 通信信道的长度， $\psi_s(d)$ 和 $\psi_m(d)$ 分别为信道的阴影衰落和多径衰落， P_s 和 P_r 对应的是信号的发送功率和接收功率。考虑上述 5G 通信信道环境特征，对信道传输控制系统的软件功能进行优化设计。

2.1 动态采集 5G 通信信道传输数据

利用系统硬件中的 5G 通信信道数据采集器，获取通信信道中的实时传输数据，采集过程可以描述为：

$$x(t) = x_c(t) \times P_r \times \psi(d) \times \kappa_a \times \kappa_{AD} \quad (3)$$

式中，变量 $x_c(t)$ 为 t 时刻 5G 通信信道中的实际传输数据， κ_a 和 κ_{AD} 分别为传输数据采集信号的放大系数和 A/D 转换系数， $\psi(d)$ 表示信道的总和衰落，该参数的计算公式如下：

$$\psi(d) = \psi_s(d) \otimes \psi_m(d) \quad (4)$$

将公式 (4) 的计算结果代入公式 (3) 中，即可得出 t 时刻 5G 通信信道传输数据的采集结果^[10]。为满足 5G 通信信道的动态变化特征，获取信道的实时传输数据，在数据采集过程中设置一个采集频率 f_g ，那么 5G 通信环境中第 i 个信道的传输数据采集结果为：

$$X_i = f_g \sum_{t=1}^{T_i} x(t) \quad (5)$$

式中， T_g 为传输数据的采集时长。在采集频率的驱动下，反复执行上述操作，完成 5G 通信信道传输数据的动态采集。

2.2 提取 5G 通信信道运行特征

5G 通信信道运行特征提取的目的是为信道运行状态的检测提供数据支持，以动态采集的传输数据为研究对象，分别从时域和频域两个方面提取传输数据特征，其中时域特征分量具体包括：均方根值、峰值、波形因子等，其中均方根值特征分量的提取结果为：

$$\tau_R = \sqrt{\frac{1}{N_g} \sum_{i=1}^{N_g} (X_i)^2} \quad (6)$$

式中， N_g 为传输数据采集量^[11]。另外峰值与波形因子特征分量的提取结果如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_P &= \frac{X_{\max}}{\frac{1}{N_g} \sum_{i=1}^{N_g} |X_i|^2} \\ \tau_W &= \frac{\sum_{i=1}^{N_g} |X_i|^2}{\sum_{i=1}^{N_g} |X_i|} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中， X_{\max} 为采集传输数据中的最大值，将采集的传输数据结果代入公式 (7) 中，即可得出 5G 通信信道时域特征的提取结果^[12]。同理可以得出频域特征中心频率、均方频率等特征向量的提取结果，最终对提取的所有特征进行融合，融合过程可以量化描述为：

$$\tau = \bar{\omega}_1 \tau_R + \bar{\omega}_2 \tau_P + \bar{\omega}_3 \tau_W + \dots \quad (8)$$

式中， $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 和 $\bar{\omega}_3$ 分别对应的是均方根值、峰值、波形因子特征向量对应的融合权值。由此完成 5G 通信信道运行特征的提取结果。

2.3 检测 5G 通信信道运行状态

采用特征匹配的方式，判断当前 5G 通信信道是否存在拥塞现象，设定拥塞状态下，通信信道的标准运行特征为 τ_j ，那么当前通信信道提取特征与拥塞标准特征之间的匹配度计算公式如下：

$$\lambda = \frac{\tau \cdot \tau_j}{\|\tau\| \cdot \|\tau_j\|} \quad (9)$$

将公式 (8) 表示的 5G 通信信道运行特征提取结果代入公式 (9) 中，即可得出信道拥塞概率的检测结果。若计算得出特征匹配度高于阈值 λ_0 ，则说明当前通信信道处于拥塞状态，否则说明当前信道可正常执行数据传输任务^[13]。除此之外，还需要度量信道的负载情况，信道占用率的测度结果为：

$$\mu_o = \frac{\lambda N_c}{W} \quad (10)$$

其中： N_c 为 5G 通信信道中处于传输状态的数据量， W 为通信信道容量。若信道占用率高于 80%。证明当前信道存在拥塞风险，否则认为信道不存在拥塞风险。综合特征匹配结果和占用率测度结果，确定当前 5G 通信信道运行状态的检测结果。

2.4 设置 5G 通信信道传输控制协议

选择轻量级 LRDP 传输协议作为 5G 通信信道的传输控制协议, 为信道数据的传输与控制提供约束。LRDP 传输协议由数据链路层、网络层、传输层、应用层等部分组成, 在信道传输控制协议的约束下, 通信数据的传输格式结构如图 7 所示。

源端口号		目的端口号			
序号					
确认号					
基础头部	保留位	URG	ACK	PSH	窗口大小
FFP 文件首包	MRG 并包	ZF 转发		EXT_II 保留	
校验和		紧急指针			

图 7 控制协议约束下 5G 通信信道传输数据格式

在轻量级 LRDP 传输协议作用下, 5G 通信信道的传输任务增加了一个多播回执机制, 并保证 5G 通信信道中的所有传输数据均按照图 7 表示格式进入信道。

2.5 利用云计算技术调度 5G 通信信道传输任务

考虑 5G 通信信道运行状态的检测结果, 针对存在拥塞的信道传输任务, 采用云计算技术对其进行调度, 能够有效降低信道的拥塞情况, 同时提高信道传输任务的执行效率^[14]。云计算技术原理如图 8 所示。

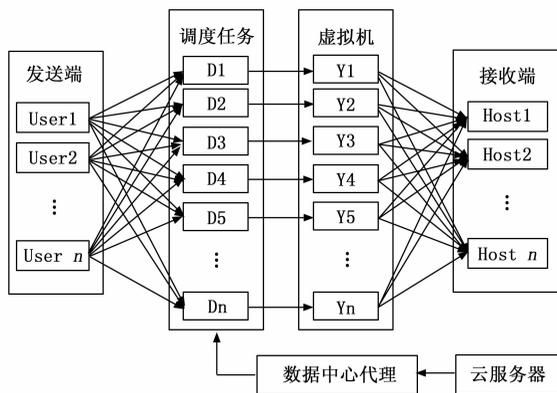


图 8 云计算技术原理图

以图 8 所示的原理作为技术支持, 按照图 9 表示的流程完成对 5G 通信信道传输任务的调度。

利用公式 (9) (10) 度量 5G 通信环境中其他信道的拥塞状态, 选择特征匹配度最低、信道占用率最低的信道作为当前传输任务的调度目标信道, 并规划具体的调度路径^[15]。调度路径的规划过程可以量化描述为:

$$L = \frac{\mu_0 \lg(1 - l_c)}{\lg[1 - (1 - l_c)^\gamma]} \quad (11)$$

其中: l_t 和 l_c 分别为传输任务的调度目标信道和当前信道, γ 为调度操作的可靠性参数。另外, 通信信道的调度量为:

$$Q = LN_c - W \quad (12)$$

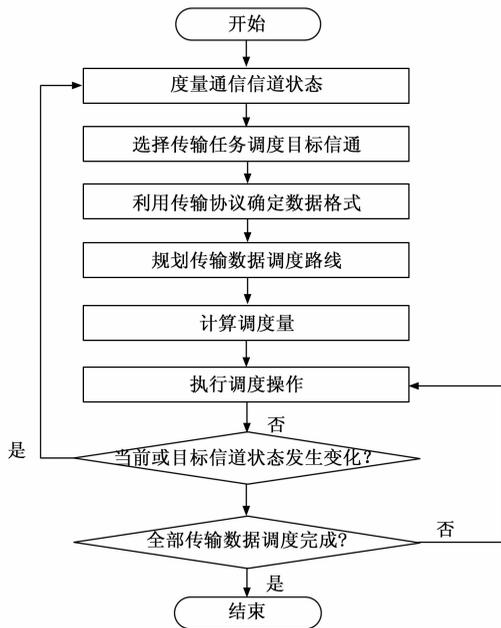


图 9 通信信道传输任务调度流程图

在实际调度过程中, 要求传输数据调度量高于 Q , 且不高于一目标信道当前的剩余容量。提取当前通信信道中的传输数据, 将其按照规划的调度路径进行传输, 使其到达目标信道, 完成通信信道传输任务的一次调度^[16-18]。在实际调度中, 需实时对当前信道与目标信道的状态进行更新, 若判断当前信道拥塞取消或目标信道发生拥塞, 立即停止调度任务^[19-20]。

2.6 实现 5G 通信信道传输控制

传输任务达到目标信道后, 通过通信信道增强、干扰消除两个步骤, 实现信道传输控制。通信信道的增强控制过程如下:

$$g_c = Q \times g_e \times \kappa_e \quad (13)$$

其中: κ_e 为通信信道的增强系数, g_c 和 g_e 分别为增强前后通信信道强度值。通信信道干扰的控制过程如下:

$$\delta = \frac{\Delta R g_c}{\kappa_c} \exp\left(-\frac{x_t}{\varphi_0}\right) \quad (14)$$

式中, ΔR 为 5G 通信信号的单位传输量, κ_c 为编码系数, x_t 为通信传输信号量, φ_0 为信号干扰抵消系数。根据 5G 通信信道传输任务的执行状态, 切换发送端和接收端的状态, 在控制器作用下, 实现系统的 5G 通信信道传输控制功能。

3 系统测试

为了测试优化设计的基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统对 5G 通信网络信道及传输任务的控制效果, 采用黑盒测试与对比测试相结合的方式, 设计系统测试实验。黑盒测试就是在未知控制对象预期效果的情况下, 通过对系统输出结果的对比, 得出系统在运行功能方面的运行效果。此次系统测试实验的基本思路为: 利用优化设计的控制系统, 对不同状态下的 5G 通信信道传输任务进行

控制,最大程度地保证数据传输的完整度和时效性。系统测试实验中设置的对比项分别为:文献 [1] 提出的基于深度增强学习与子流耦合感知的传输控制系统和文献 [2] 提出的基于自适应网络编码的传输控制系统,通过相关数据与指标的对比,体现出优化设计系统在控制效果方面的优势。

3.1 布设 5G 通信网络环境

为保证 5G 通信网络环境的可控性,部署物理隔离的 5G 网络作为测试环境,首先在区域环境内安装多个交换机、主机、路由器以及网关设备,形成多路径对称网络拓扑结构,将交换机定义为根交换机和边缘交换机,根交换机与所有的边缘交换机互联,而边缘交换机与主机以及路由器相连。选择使用 TendaW311M 型号的 USB 无线网卡;TP-LINK 无线路由设备,在开发板和 PC 上分别安装一对无线网卡,需要分别安装网卡驱动,启动 ping 命令来检测网络是否畅通。PC 端可以准确地获得另一方的 IP 地址,并且与另一方的网络通讯顺畅。通过物理隔离的设置,保证布设的 5G 通信网络不会受到其他通信信号的干扰,同时不影响布设通信网络的运行。布设的 5G 通信网络的总占地面积为 3 000 m²,网络内包含主机节点 500 个,路由器、交换机和网关设备数量均为 200。在实验开始之前,将通信网络中包含的所有设备调整至启动状态,判断布设的 5G 通信网络是否能够生成传输信道并产生通信信号,并完整生成的通信信号是否达到 5G 通信要求。

3.2 设定 5G 通信网络信道状态

选择布设 5G 通信网络中的 8 条信道作为此次实验的研究对象,通过通信数据的输入与信道传输进程的控制,实现对 5G 通信网络信道状态的设定。初始状态下,5G 通信网络信道状态的设定情况,如图 10 所示。



图 10 通信网络信道初始状态示意图

从图 10 中可以看出,布设 5G 通信网络中 4 条信道存在拥塞现象,其中一条信道处于完全拥塞状态,另外四条信道中,两条处于正常传输状态,一条处于完全空闲状态,另一条处于部分正常传输、部分空闲状态。

3.3 准备 5G 通信信道传输数据样本

收集文本、数据、图像、视频、音频等不同类型的数 据作为 5G 通信信道的传输对象,各个信道准备的传输数据 样本如表 1 所示。

表 1 通信信道传输样本数据表

传输信道 编号	发送端节点 编号	接收端节点 编号	传输数据 类型	传输数据量 /MB
01	F16	J21	文本	5.85
02	F24	J13	文本	6.90
03	F33	J15	数据	4.65
04	F08	J29	图像	15.60
05	F14	J06	图像	25.40
06	F23	J04	视频	38.65
07	F06	J18	视频	41.25
08	F12	J24	音频	20.50

将表 1 中所示的 5G 通信信道传输数据样本分别输入到 相应的发送端节点中,从而完成数据样本向通信网络传输 队列的加入工作。

3.4 描述系统测试实验过程

实验采用 Mininet 作为系统开发与测试平台,Mininet 充分利用了 Linux 命名空间内核技术,对网络资源的模拟 发挥着重要作用,它可以在进程级上实现物理资源的虚拟 化,为云计算技术的运行提供基础。利用 Mininet 工具对基 于云计算的 5G 通信信道传输控制系统的软件部分进行编 码,将其导入到 5G 通信网络环境中的任意主机中,将其定 义为主测计算机,通过硬件设备的连接,完成系统的开发。 将通信信道、传输数据样本以及传输任务接入到系统运行 程序中,得出系统运行结果如图 11 所示。

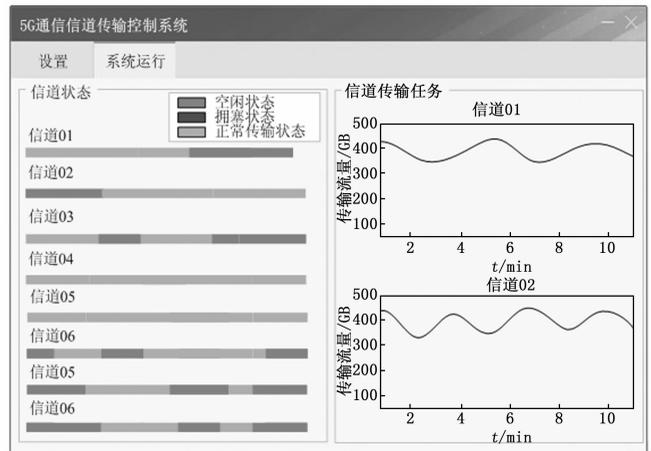


图 11 5G 通信信道传输控制系统运行界面

按照上述方式,对系统测试实验设置的对比控制系统 进行开发,并得出相应的运行输出结果。

3.5 设置系统测试指标

此次实验分别从传输任务的执行效果和信道的拥塞情 况两个方面进行测试,传输任务执行效果的量化测试指标 分别为误码率和传输数据丢包率,上述指标的数值结果

如下：

$$\begin{cases} \eta_{\text{Error code}} = \frac{n_{\text{Error code}}}{n_{\text{sending}}} \times 100\% \\ \eta_{\text{Loss}} = \left(\frac{n_{\text{sending}} - n_{\text{receive}}}{n_{\text{sending}}} \right) \times 100\% \end{cases} \quad (15)$$

其中： $n_{\text{Error code}}$ 、 n_{sending} 和 n_{receive} 分别为接收传输数据中的错误数据、发送到信道中的传输数据量以及实际接收到的数据量。计算得出误码率和丢包率越小，证明对应系统对传输任务执行质量的控制效果越好。数据传输速度是信道拥塞状态的直观表现，因此设置通信信道中数据的传输速度作为测试指标，该指标的测试结果为：

$$v_{\text{transmission}} = \frac{n_{\text{transmission}}}{\Delta t} \quad (16)$$

式中， $n_{\text{transmission}}$ 和 Δt 分别为信道中的数据传输量和数据传输时间。计算得出数据传输速度越快，证明通信信道的拥塞程度越低，即对应系统的控制功能越优。

3.6 系统测试实验结果与分析

3.6.1 信道传输质量测试结果

5G 通信信道环境有无外界干扰直接影响信道的传输质量，因此在信道传输质量的测试分别从有、无外界干扰两个场景下进行。通过发送端与接收端数据的统计，得出无干扰场景下通过不同 5G 通信信道传输控制系统的应用，信道传输任务误码率和传输数据丢包率的测试结果，如表 2 所示。

表 2 无干扰场景下信道传输误码率和丢包率测试数据表 GB

传输信道编号	基于深度增强学习与子流耦合感知的传输控制系统		基于自适应网络编码的传输控制系统		基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统	
	接收数据量	错误数据量	接收数据量	错误数据量	接收数据量	错误数据量
01	5.21	0.67	5.31	0.56	5.8	0.02
02	6.18	0.84	6.22	0.74	6.84	0.02
03	3.72	0.82	3.83	0.49	4.61	0.01
04	14.39	1.14	14.69	0.47	15.58	0.02
05	24.01	1.22	24.52	0.57	25.37	0.03
06	37.41	1.06	37.89	0.63	38.6	0.01
07	39.98	1.21	40.61	0.75	41.21	0.02
08	19.1	1.33	19.84	0.82	20.47	0.03

将表 1 和表 2 中的数据代入公式 (15)，计算得出无干扰场景下两种对比系统的平均误码率分别为 8.19% 和 5.44%，平均丢包率分别为 8.47% 和 6.59%，而优化设计系统控制下误码率和丢包率的平均值分别为 0.16% 和 0.40%。在布设的 5G 通信网络环境中，加设信号干扰设备，并将其调整至启动状态，干扰强度设置为 5 dB，重复上述操作，得出有干扰场景下不同系统控制作用下，信道传输误码率和丢包率指标的测试结果，如表 3 所示。

通过公式 (15) 的计算，得出有干扰场景下，应用 3 种传输控制系统，得出信道传输数据的平均误码率分别为 10.13%、6.10 和 0.22%，信道传输数据丢包率的平均值分别为 11.85%、9.03 和 0.48%。由此可以看出，在有、无干扰

场景下，应用优化设计控制系统对应 5G 通信信道传输数据的误码率和丢包率更低，通过两种场景的对比，发现在有干扰场景下信道传输误码率和丢包率均存在不同程度地提升，但应用优化设计控制系统，误码率和丢包率的涨幅不明显。

表 3 有干扰场景下信道传输误码率和丢包率测试数据表 GB

传输信道编号	基于深度增强学习与子流耦合感知的传输控制系统		基于自适应网络编码的传输控制系统		基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统	
	接收数据量	错误数据量	接收数据量	错误数据量	接收数据量	错误数据量
01	5.06	0.79	5.12	0.66	5.80	0.04
02	6.11	0.98	6.03	0.82	6.82	0.02
03	3.42	1.12	3.51	0.57	4.60	0.01
04	13.78	1.28	14.12	0.51	15.58	0.02
05	23.55	1.44	24.04	0.59	25.35	0.04
06	37.04	1.31	37.62	0.65	38.60	0.02
07	39.13	1.56	40.55	0.79	41.20	0.02
08	17.40	1.68	19.80	0.86	20.47	0.03

3.6.2 信道传输速率测试结果

通信环境中的干扰对信道传输速率之间无直接关系，因此传输速率的测试仅在无干扰条件下进行。在 3 种系统的控制作用下，对 5G 通信信道中数据的传输速度进行测度，通过公式 (16) 的计算得出传输速度测试结果，如图 12 所示。

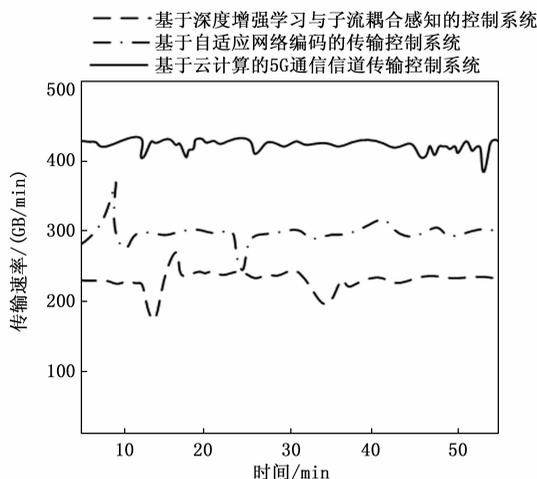


图 12 5G 通信信道传输速率测试结果

从图 12 中可以直观地看出，3 种控制系统作用下，5G 通信信道的平均数据传输速度分别为 229、303 和 406 GB/min。综合上述指标的测试结果可以得出结论：与传统控制系统相比，优化设计的基于云计算的 5G 通信信道传输控制系统的控制功能更优。

4 结束语

5G 通信网络已经成为时代发展的大趋势，要充分把握 5G 通信网的各个应用场景，注重对信道的合理控制，才能 (下转第 138 页)