

# 基于并行干扰抵消的 5G 通信信道传输控制系统设计

李瑞华, 冯治东

(榆林学院 信息工程学院, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 为解决 5G 通信信号的连接超时问题, 使其在单帧、多帧、连续帧情况下, 均能呈现出较为流畅的传输状态, 设计基于并行干扰抵消的 5G 通信信道传输控制系统; 联合主电源模块与通信信号采集模块, 并将输出控制结构、数据处理结构接入电源平台的既定控制节点之中, 完成 5G 通信信道传输控制系统的功能方案设计; 在此基础上, 分析 5G 通信信道内的信号传输环境, 通过设置并行干扰抵消检测器的方式, 得到残余多址信息的表达结果, 完成基于并行干扰抵消的 5G 通信信道配置; 根据干扰方差计算表达式, 确定 5G 通信信号的传输误码率水平, 实现对系统控制指令的分析与研究, 结合相关硬件设备结构, 完成基于并行干扰抵消的 5G 通信信道传输控制系统设计; 实验结果显示, 与动态无线控制系统相比, 在并行干扰抵消算法作用下, 5G 通信信号在单帧、多帧、连续帧情况下的连接时长均能得到较好控制, 这对于信号参量的流畅传输能够起到一定的促进性影响作用。

**关键词:** 并行干扰抵消; 5G 通信; 信道传输; 数据处理; 残余多址; 干扰方差

## Design of 5G Communication Channel Transmission Control System Based on Parallel Interference Cancellation

LI Ruihua, FENG Zhidong

(College of Information Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China)

**Abstract:** In order to solve the connection timeout problem of the 5G communication signal, and enable it to present a relatively smooth transmission state in the cases of single frame, multiple frame and continuous frame, a 5G communication channel transmission control system based on the parallel interference cancellation is designed. The main power module and communication signal acquisition module are combined, and the output control structure and data processing structure are connected to the established control nodes of the power platform to complete the functional scheme design of the 5G communication channel transmission control system. On this basis, the signal transmission environment in the 5G communication channel is analyzed. By setting the parallel interference cancellation detector, the expression result of residual multiple access information is obtained, and the 5G communication channel configuration based on the parallel interference cancellation is completed. According to the interference variance calculation expression, determines the transmission error rate level of the 5G communication signal, realizes the analysis and research of the system control instructions, combined with the structure of related hardware equipment, complete the design of 5G communication channel transmission control system based on parallel interference cancellation. The experimental results show that compared with the dynamic wireless control system, under the action of parallel interference cancellation algorithm, the connection duration of the 5G communication signal can be better controlled in the cases of single frame, multi-frame and continuous frame, which can play a certain promoting effect on the smooth transmission of the signal parameters.

**Keywords:** parallel interference cancellation; 5G communication; channel transmission; data processing; residual multiple access; interference variance

## 0 引言

并行干扰抵消算法可以通过估算用户接入行为的方式, 确定通信数据对于多径信道的干扰强度, 在实际应用过程中, 为避免数据信息出现明显的堆积行为, 可从已接收信号中剔除非必要的信息参量, 并将剩余信息参量与数据库主机中暂存的文件信息混合起来, 以供核心通信体系的调

取与利用<sup>[1]</sup>。与常规并行干扰消除手段相比, 并行干扰抵消算法能够逐步减轻信号参量对用户节点造成的干扰性影响, 并可在不改变通信数据原有排列形式的情况下, 将这些指标参量从一个存储单位转移至另外一个存储单位中, 从而使得通信主机所面临的信息共享压力得到有效缓解<sup>[2]</sup>。简单来说, 并行干扰抵消算法就是对通信网络不断“做减法”的处理方式, 且随着数据信息累积量的增大, 网络主

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-03-15。

基金项目: 国家自然科学基金(51864046); 榆林市科技局(CXY-2020-007-04); 榆林市高新区科技创新局(CXY-2020-03)。

作者简介: 李瑞华(1978-), 女, 陕西绥德人, 硕士, 副教授, 主要从事数据挖掘、大数据技术方向的研究。

引用格式: 李瑞华, 冯治东. 基于并行干扰抵消的 5G 通信信道传输控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 160-165.

机也不会再次出现运行速度下降的表现情况。

5G 通信是同时具有低时延、高速率的新一代宽带移动通信技术, 不但能够维持客户端与客户端之间的稳定通信关系, 还可以为接入用户提供虚拟现实、超高清视频的服务, 从而实现了由语音业务到数据业务的转变<sup>[3]</sup>。随着 5G 通信业务的开展, 信号参量在单帧、多帧、等情况下连接时长始终不能达到理想数值标准的问题逐渐凸显出来, 这也是导致 5G 通信信号流畅传输能力相对较低的主要原因。传统动态无线控制系统遵循 CDMA 技术, 对 5G 通信信号进行分配, 虽然具备用户容量大、覆盖范围广等应用优势, 但随着数据流波动行为的出现, 单帧、多帧、连续帧信号的物理时延问题依然存在, 这不但不能缩短通信信号的连接时长, 还会对信号参量的传输流畅性造成影响<sup>[4]</sup>。为避免上述情况的发生, 引入并行干扰抵消算法, 并以此为基础, 设计一种新型的 5G 通信信道传输控制系统, 再通过对比实验的方式, 突出该系统的实际应用价值。

### 1 5G 通信信道传输控制系统的功能方案

5G 通信信道传输控制系统的主体硬件结构包含电源模块、信号采集模块、输出控制模块、数据处理模块几个部分, 本章节将针对上述模块结构的应用功能展开研究。

#### 1.1 主电源模块

主电源模块负责对 5G 通信信道传输控制系统提供电量信号, 以 LM2576 驱动芯片作为核心搭建结构。整个电源模块同时包含两个 VCC 正极输入端和两个负极 VDD 输出端, 前者负责对电量信号进行整合与处理, 可以从中提取带电量水平较低的传输信号, 并将其反馈回输出端主机之中; 后者能够以极低的电量水平, 将电量信号反馈给下级硬件应用结构。

LM2576 驱动芯片左侧同时与两个 LM117 主板和两个 A3977 主板相连。在实际应用过程中, 每一个 LM117 主板都与一个触发器结构保持对应连接关系, 能够在准确捕捉电量信号的同时, 对未完全消耗的传输电流进行二次整合, 并将其转存至步进电机结构之中, 以供通信主机的继续调取与利用<sup>[5-6]</sup>。在 RF24L01B 元件的作用下, 仅有一个 A3977 主板能够与触发器结构相连, 二者共同维护 5G 通信信号的传输稳定性, 并可在收集 R 电阻内剩余电量的同时, 使传输电流的数值水平不出现过度增大的变化趋势。具体主电源模块的连接框图结构如图 1 所示。

在主电源模块中, 步进电机必须与 RF24L01B 元件直接相连, 且整条连接通路中应同时包含多个应用电阻结构。

#### 1.2 通信信号采集模块

在主电源模块的作用下, 5G 通信信号的放大倍数已被初步确定, 因此信道组织中所有满足传输需求信号参量的放大倍数都不可能等于“1” (详细结构框图如图 2 所示)<sup>[7]</sup>。从功能性角度来看, 通信信号采集模块的作用能力相当于一个局限性的通信行为控制装置, 可在核心控制主机的作用下, 筛选传输信号中的可利用成分, 并可将这些

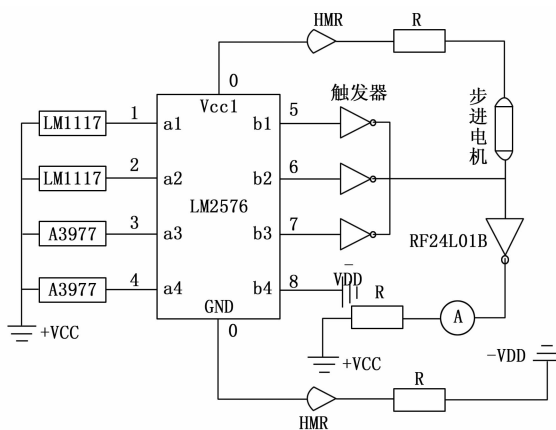


图 1 主电源模块的连接框图

信息参量暂时存储于系统数据库主机之中。由于 FPGA 元件的存在, AD506 模拟器的连接行为始终受到较强的限制性作用, 特别是在 5G 通信信号原始放大倍数较大的情况下, 这些信息参量可在不经过放大器元件的情况下, 直接进入 AD 转换结构当中, 一方面缩短了 5G 通信信号在特定传输过程中的连接时长, 另一方面可以将信号参量在信道组织中的消耗情况控制在相对较低的数值水平<sup>[8]</sup>。

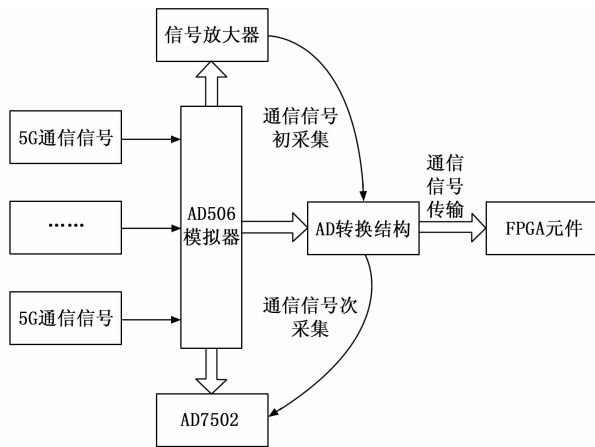


图 2 通信信号采集模块示意图

为使 5G 通信信号得到准确辨别, 采集模块对这些信号参量的采集指令必须分两次进行, 第一次采集由信号放大器指向 AD 转换结构的通信信号, 第二次采集由 AD 转换结构指向 AD7502 芯片的通信信号。

#### 1.3 输出控制模块

输出控制模块作为 5G 通信信道传输控制系统的核心应用结构, 可在 ARINC749 总线通路的作用下, 配比信道组织内控制指令的分布情况, 一方面能够满足系统主机对于 5G 通信信号传输行为进行按需管控的实际应用需求, 另一方面还可以避免信号参量在系统数据库主机中大量堆积, 从而解决现有的信号连接超时问题<sup>[9]</sup>。从结构组成的角度来看, 输出控制模块同时包含一个 5G 通信信号输出芯片、一个通信机载设备、一个 AGC 采集芯片和多个关联信道组

组织结构（具体结构组成形式如图 3 所示）。5G 通信信号输出芯片可直接转存 ARINC749 总线中的信号参量，并可在准确提取待传输信号参量的同时，将剩余数据信息按需配比至关联信道组织结构体之中，以便于系统控制指令的制定与传输<sup>[10]</sup>。通信机载设备作为 5G 通信信号输出芯片与 AGC 采集芯片之间的过渡装置，可在负载下级 FPGA 组织连接需求的同时，计算系统主机内的信号管控占比率指标，从而使得通信信道控制系统能够长期处于相对稳定的连接状态。

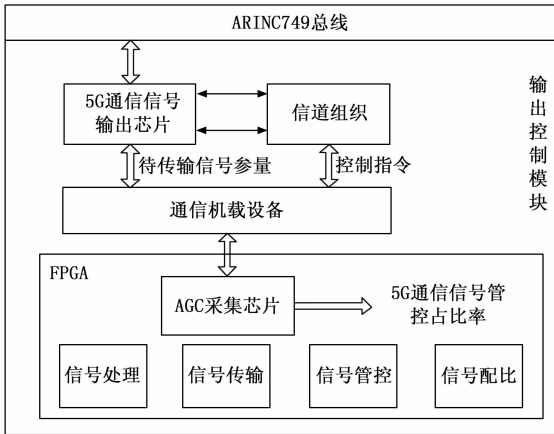


图 3 输出控制模块的连接结构

AGC 采集芯片存在于 FPGA 组织之中，同时具备信号处理、信号传输、信号管控、信号配比等多项执行能力。

### 1.4 数据处理模块

在 5G 通信信道传输控制系统中，数据处理模块以 FSM 芯片作为核心搭建结构，能够在负载连接电阻元件的同时，对数据库主机中累积的 5G 通信信号进行疏导处理，并可借助已连接的通信信道组织，将这些信号参量反馈至既定硬件结构体之中，不但实现了 5G 通信信号的快速连接，也使得这些数据信息在单帧、多帧、连续帧情况下均能保持流畅且稳定的传输状态<sup>[11]</sup>。C++ 处理器作为 FSM 芯片的辅助应用结构，能够整合处于传输状态的 5G 通信信号，并可以借助 ASCLL 元件，将数据包形式的信号参量再次反馈回输出控制模块、LM2576 驱动芯片等多个硬件连接结构中。在数据处理模块右端存在两个通信数据连接触点，作为信号参量传输通路，负责对 5G 通信信号进行输出与输入处理。

数据处理模块内连接电阻的数值水平相对较低，在考虑通信信号并行干扰抵消作用的情况下，电阻结构可为帮助模块体系分得较低水平的传输电压与电流，这也是信号连接表现时长能够得到较好控制的主要原因<sup>[12]</sup>。

## 2 基于并行干扰抵消的 5G 通信信道配置

根据并行干扰抵消算法，分析 5G 通信信道的内部传输环境，再通过设置控制指令执行所需检测器元件的方式，得到准确的残余多址表达结果，从而完成基于并行干扰抵消的通信信道配置。

### 2.1 5G 通信信道环境分析

5G 通信信道的内部传输环境分析包含通信数据抵消量研究、关联信息干扰强度计算两个方面。

(1) 在信道组织内，由于信息覆盖问题的存在，会导致一部分 5G 通信信号无法呈现其预期传输状态，但为使控制系统内的数据信息传输行为始终维持稳定，这些非正常信号表明会覆盖一定数量的假性通信信号，这种假性通信信号对于常规通信信号的覆盖作用就被成为通信数据抵消<sup>[13]</sup>。设  $s$  表示既定的 5G 通信信号编码系数， $a$  表示信号传输指征， $d_a$  表示指征为  $a$  时的传输信号预估值， $d_{\max}$  表示传输信号预估值的最大数值结果， $\bar{d}$  表示系数  $d_a$  与系数  $d_{\max}$  的物理平均值。联立上述物理量，可将 5G 通信信道内的通信数据抵消量计算式定义为：

$$g(s) = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^{+\infty} |d_{\max} - d_a|^2}{s \cdot \bar{d} - |\Delta H| \epsilon^{-1}}} \quad (1)$$

式中， $\Delta H$  表示 5G 通信信号的单位传输量， $\epsilon$  表示假性覆盖系数。

(2) 关联信息干扰描述了假性通信信号对于 5G 通信信号的影响能力，在考虑并行干扰抵消算法的情况下，关联信息干扰强度指标取值越大，则表示主机元件对于通信信道组织的控制能力相对较弱，反之则较强<sup>[14]</sup>。设  $\varphi_s$  表示编码系数为  $s$  时的干扰指标定义项， $f$  表示假性通信信号与 5G 通信信号之间的抵消行为定义标准。联合上述物理量，可将 5G 通信信道内的关联信息干扰强度表达式定义为：

$$k(s) = \frac{|\Delta H|}{\varphi_s} \exp\left(-\frac{\bar{d}^2}{2f}\right) \quad (2)$$

为准确控制 5G 通信信道内的信息传输行为，并行干扰抵消算法的应用必须同时参考通信数据抵消量、关联信息干扰强度两项物理系数指标。

### 2.2 并行干扰抵消检测器设置

并行干扰抵消检测器能够准确分辨信号参量在 5G 通信信道环境内的传输情况，并可以根据控制主机所下达的判决指令，剔除影响能力较强的假性通信信号，从而使得原通信信号暴露出来，并最终抵消这种不合理传输行为，对通信信道应用稳定性造成的影响<sup>[15]</sup>。

在已知 5G 通信信道内部传输环境的前提下，并行干扰抵消检测器的连接能力会受到数据并行标度、信息参量干扰消除权限两项指标参量的直接影响<sup>[16]</sup>。数据并行标度可表示为  $\lambda$ ，在 5G 通信信道传输控制系统中，由于并行干扰抵消算法的作用强度并不能始终维持稳定，所以该项物理指标的取值结果也会不断发生变化。信息参量干扰消除权限可表示为  $\omega$ ，作为与 5G 通信信号相关的唯一定值指标，该项物理系数的取值结果始终处在自然数 1 与  $e$  之间。

在上述物理量的支持下，联立公式 (1)、公式 (2)，可将并行干扰抵消检测器的连接条件定义为：

$$L = \frac{|b_\omega \cdot \sqrt{\lambda} j_\omega|^{1-\gamma}}{(g(s)^2 + k(s)^2)} \quad (3)$$

其中:  $b_\omega$  表示消除权限为  $\omega$  时的 5G 通信信号并行传输量,  $j_\omega$  表示既定时刻通信信道承载的信号并行传输行为量,  $\gamma$  表示与检测器设备相关的信号干扰项定标值。出于实用性考虑, 并行干扰抵消检测器元件的设置可行性应以符合控制系统实际应用情况为判别标准。

### 2.3 残余多址表达

残余多址表达是并行干扰抵消算法构建的重要实践环节, 能够屏蔽大量的非常规 5G 通信信号, 使其长期存储于信道组织当中, 使得已发生执行错误的控制指令不会表达处理, 从而缩减系统控制主机所需执行的指令地址分拣任务量<sup>[17-18]</sup>。对于系统控制主机而言, 残余多址表达也可以叫做剩余通信地址的表达性译码, 在不考虑 5G 通信信号传输量的条件下, 只要信道组织足够长, 所有通信地址就都能得到准确表达, 此时剩余地址信息的物理数值量越少, 并行干扰抵消算法的作用能力也就越强。

设  $\tilde{x}$  表示基于并行干扰抵消算法的残余地址度量向量,  $B_\sigma$  表示信道感应强度为  $\sigma$  时的 5G 通信指标,  $B_\nu$  表示信道感应强度为  $\nu$  时的 5G 通信指标,  $c_1, c_2, \dots, c_m$  分别表示  $m$  个残余地址的编码系数, 联立公式 (3), 可将基于并行干扰抵消算法的残余地址统计结果表示为:

$$Z = \frac{\tilde{x}^2 (B_\sigma - B_\nu)^2}{L \times (c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_m^2)} \quad (4)$$

在公式 (4) 的基础上, 规定  $p_1, p_2$  表示两个随机选取的多址译码系数, 且在考虑并行干扰抵消算法的情况下,  $p_1 \neq p_2$  的不等式条件恒成立,  $i$  表示通信信道对于信号参数的最小管控系数,  $\theta$  表示  $i$  指标的最大取值结果,  $\bar{E}$  表示单位时间内的通信信号抵消量均值,  $\beta$  表示等效抵消系数,  $\Delta T$  表示单位表达时长。在上述物理量的支持下, 联立公式 (4), 可将与 5G 通信信道传输控制系统匹配的残余多址表达公式定义为:

$$V = \prod_{i=1}^{\theta} \frac{Z \times |p_2 - p_1|^2}{\frac{\beta \cdot \bar{E}}{|\Delta T|}} \quad (5)$$

一般来说, 残余多址信息的剩余量越大, 表达定义式对于系统控制主机的约束作用也就越强, 在此情况下, 也就有越多的不合理通信信号参数能够得到并行抵消处理。

## 3 控制行为分析

在 5G 通信信道传输控制系统中, 为保证并行干扰抵消算法的顺利应用, 要求现有控制行为表达式必须同时满足干扰方差与传输误码率计算结果, 本章节将针对上述问题展开研究。

### 3.1 干扰方差计算

干扰方差决定了并行干扰抵消算法的作用强度, 在 5G 通信信道传输控制系统中, 该项指标参数的数值结果越精确, 就表示信道组织对于 5G 信号参数的承载能力越强<sup>[19]</sup>。设  $q_1, q_2, \dots, q_m$  表示  $m$  个互补干扰的通信信号抵消标度值, 且在考虑并行干扰抵消算法作用行为的情况下, 上述  $m$  个标度值不完全相等的物理条件恒成立。 $\varphi$  表示控制主机

所遵循的通信信号提取权限,  $\theta$  表示并行性控制系数, 联立上述物理量, 可将 5G 通信信道传输控制系统中的信号干扰方差计算结果表示为:

$$Q = \varphi \times V \times \left\{ \begin{matrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_m \end{matrix} \right\} \times \theta \quad (6)$$

方差指标的取值结果越趋近真实应用情况, 就表示系统主机对于 5G 通信信道传输行为的控制能力越强, 因此在完成系统设计时, 应将干扰方差计算表达式作为核心判别条件<sup>[20]</sup>。

### 3.2 传输误码率

传输误码率描述了系统控制指令传输错误行为的出现几率, 由于并行干扰抵消算法的存在, 误码率指标的取值必须同时参考信道组织内的信号感应权限、最小抵消参量等多项物理系数<sup>[21-22]</sup>。信号感应权限可表示为  $\bar{\omega}$ , 作为一项矢量化指标, 该项物理系数的取值结果具有一定的方向性, 其中小于零的系数指标表示 5G 通信信号在信道组织内保持负方向传输行为, 而大于零的系数指标则表示 5G 通信信号在信道组织内保持正方向传输行为。最小抵消参量可表示为  $u$ , 该项系数指标的取值结果将直接影响传输误码率的最终计算数值, 一般来说, 抵消参量取值越大, 当前情况下的信号传输误码率水平也就越高, 反之则越低<sup>[23-24]</sup>。在上述物理量的支持下, 联立公式 (6), 可将 5G 通信信道传输控制系统的传输误码率计算式定义为:

$$Y = \text{sgn} \left[ \bar{\omega} Q + \sum_{u=1}^{+\infty} (R_u + O_u)^2 \right] \quad (7)$$

式中,  $R_u$  表示最小抵消参量取值为  $u$  时的控制指令行为向量,  $O_u$  表示最小抵消参量取值为  $u$  时的控制指令干扰向量。

## 4 实例分析

选取图 4 所示 5G 通信信号塔作为实验对象, 借助相同型号的信道组织建立实验组、对照组系统主机与信号塔之间的通信连接关系, 其中实验组主机搭载基于并行干扰抵消的 5G 通信信道传输控制系统, 对照组主机搭载传统动态无线控制系统。



图 4 5G 通信信号塔

5G 通信信号的连接时长能够反映信号参数的传输流畅水平, 一般来说, 通信信号连接所需耗时越短, 表示信号参数的传输行为越流畅, 即信道传输控制系统的作用能力较强。

图 5 反映了 5G 通信信号在单帧、多帧、连续帧情况下所需连接耗时的理想数值水平。

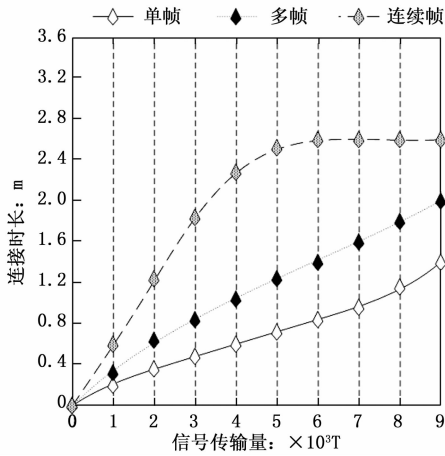


图 5 通信信号的理想连接时长

分析图 5 可知, 在单帧、多帧情况下, 5G 通信信号的连接时长均呈现不断增大的数值变化状态; 在连续帧情况下, 5G 通信信号的连接时长则呈现出先增大、再持续趋于稳定的变化状态。

表 1 记录了实验组、对照组 5G 通信信号在单帧情况下所需的连接耗时。

表 1 单帧情况下的连接耗时

信号传输量 / ( $\times 10^3 T$ )	理想连接耗时 /mm	实验组连接耗时 /mm	对照组连接耗时 /mm
1	0.21	0.20	0.23
2	0.35	0.33	0.36
3	0.48	0.45	0.47
4	0.59	0.56	0.62
5	0.74	0.73	0.75
6	0.82	0.81	0.83
7	0.93	0.90	0.94
8	1.12	1.12	1.15
9	1.38	1.35	1.40

分析表 1 可知, 在单帧情况下, 实验组、对照组信号连接时长与理想连接时长之间的物理差值水平始终较小, 但对对照组均值水平略高于实验组。

表 2 记录了实验组、对照组 5G 通信信号在多帧情况下所需的连接耗时。

表 2 多帧情况下的连接耗时

信号传输量 / ( $\times 10^3 T$ )	理想连接耗时 /mm	实验组连接耗时 /mm	对照组连接耗时 /mm
1	0.37	0.35	0.39
2	0.51	0.50	0.56
3	0.82	0.79	0.88
4	1.03	1.00	1.10
5	1.22	1.20	1.26
6	1.40	1.38	1.47
7	1.59	1.56	1.70
8	1.80	1.77	1.89
9	1.98	1.95	2.04

分析表 2 可知, 在多帧情况下, 实验组信号连接时长与理想连接时长之间的物理差值水平依然较小; 对照组信号连接时长与理想连接时长之间的物理差值水平则大于实验组, 整体均值水平也高于实验组。

表 3 记录了实验组、对照组 5G 通信信号在连续帧情况下所需的连接耗时。

表 3 连续帧情况下的连接耗时

信号传输量 / ( $\times 10^3 T$ )	理想连接耗时 /mm	实验组连接耗时 /mm	对照组连接耗时 /mm
1	0.58	0.54	3.08
2	1.21	0.59	3.08
3	1.83	0.63	3.07
4	2.26	0.65	3.08
5	2.50	0.67	3.08
6	2.59	0.67	3.08
7	2.60	0.67	3.08
8	2.60	0.67	3.09
9	2.60	0.67	3.08

分析表 3 可知, 在连续帧情况下, 实验组信号连接时长与理想连接时长数值的变化趋势基本保持一致, 但实验组均值水平却明显更低; 对照组信号连接时长则始终保持相对稳定的数值存在状态, 但其均值水平远高于理想数值与实验组数值。

综上所述, 在基于并行干扰抵消的控制系统的的作用下, 5G 通信信号在单帧、多帧、连续帧情况下的连接时长均出现了一定程度的下降趋势, 这就表示信号参量在上述情况下始终可以维持较为流程的传输行为, 对于凸显信道传输控制系统的应用价值能够起到适当的促进性影响作用。

## 5 结束语

与动态无线控制系统相比, 新型 5G 通信信道传输控制系统在并行干扰抵消算法的作用下, 重新规划了主电源模块、通信信号采集模块、输出控制模块等硬件应用结构的连接行为, 又借助检测器结构, 确定干扰方差的具体数值, 从而得到最终的传输误码率计算结果。从实用性角度来看, 在这种新型控制系统的作用下, 5G 通信信号的连接时长确实出现了明显下降的变化趋势, 不但能够促进信号参量的流畅传输, 也可以增强信道组织对于信号参量的承载能力, 具备较强的实际应用可行性。

### 参考文献:

[1] 吴 炜, 王文籍, 王 斌. 基于分段反变换的无线全双工多径自干扰信号抵消方法 [J]. 信号处理, 2020, 36 (2): 188-195.  
 [2] 秦 伟, 胡春静, 彭木根, 等. 面向高速移动场景的 F-OFDM 并行干扰消除技术 [J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44 (4): 12-18.  
 [3] 徐顺清, 石晶林, 张宗帅, 等. 5G 通信中基于混合波束成型的多用户 MIMO 调度算法研究 [J]. 高技术通讯, 2020, 30 (6): 545-552.

- [4] 李 冲, 周坤卓, 石章海. 一种双拾取动态无线电能传输系统控制方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (21): 149-156.
- [5] 王 宇, 马 伟, 胡伟波, 等. 高频驱动电路与高效 GaN HEMT 电源模块的实现 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (7): 38-43.
- [6] 牛云飞, 干方宇, 高 明, 等. 一种 DC/DC 电源模块热阻模型建立和散热设计 [J]. 电力电子技术, 2021, 55 (4): 137-140.
- [7] 付国红, 张前丰, 程 辉. 基于 STM32 和 LabVIEW 的双频微电信号采集系统设计 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35 (1): 287-293.
- [8] 常 明, 胡 锐, 汪弋平, 等. 面向射频信号 A/D 采样的高速光电导开关设计与研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (9): 176-182.
- [9] 丁红旗, 马伏军, 徐千鸣, 等. 模块化多电平换流器子模块 IGBT 损耗优化控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (17): 143-152.
- [10] 张建坡, 崔涤穹, 田新成, 等. 自阻自均压模块化多电平换流器子模块拓扑及控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (18): 3917-3926.
- [11] 汪洪潮, 杨俊峰, 王天星, 等. 流处理数据获取系统中的通用显示模块实现 [J]. 数据采集与处理, 2021, 36 (2): 374-383.
- [12] 戎 江, 马世博, 闫华军, 等. ABAQUS 二次开发在动态剪切挤压连接仿真中的应用 [J]. 河北科技大学学报, 2021, 42 (3): 311-318.
- [13] 兰 天, 周凡卉, 杨培尧, 等. 一种时间同步 1553B 总线通信协议 RT 突发数据发送控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (9): 95-100.
- [14] 吴 鑫, 伍友利, 高 翔, 等. 基于 FP 增长算法的红外抗干扰 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 116-119, 134.
- [3] 秦 剑, 万建成, 贾 宁, 等. 导线接续管钢套对放线滑车的冲击计算方法及接触过程分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (3): 130-136.
- [4] JEHa RYU, HO-SOO KIM, HONG JAE YIM. An efficient and accurate dynamic stress computation by flexible multibody dynamic system simulation and reanalysis [J]. KSME International Journal, 2017, 11 (4): 386-396.
- [5] NAYFEH A H. Cargo-Pendulation Reduction in Boom Cranes via Cable-Length pulation [C] // 41st AIAA, Atlanta, GA, 2010: 3-61.
- [6] ZI B, DUAN B Y, DU J L. Dynamic modeling and active control of a suspended parallel robot [J]. Energy and Buildings, 2018, 18 (1): 1-12.
- [7] ANDREW S. E. Efficient Modeling of Extensible Cables and Pulley Systems in Adams [C] // In: Europe Adams Conference, London, 2012: 1-10.
- [8] 鞠彦忠, 郭 圣. 基于 Adams 平台的张力架线动力学仿真分析 [J]. 水电能源科学, 2014, 32 (9): 186-202.
- [9] 郭昊坤, 衡思坤, 展展烽, 等. 架空输电线路导线舞动在线监测系统研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (14): 3464-3466, 3474.
- [10] 聂 冰, 等. 架空输电线路舞动检测装置的研究和设计 [D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- 扰评估指标简约方法 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2021, 22 (1): 99-104.
- [15] 廖 勇, 孙 宁, 王 帅, 等. 面向 LTE-V2X 系统的双迭代信号检测算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48 (3): 1-8.
- [16] 袁 帅, 王 康, 单 义, 等. 基于多分支并行空洞卷积的多尺度目标检测算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33 (6): 864-872.
- [17] 胡忠林, 赵晓冬, 吴夕科. 智能电容器自动分配通讯地址的设计与实现 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (1): 14-17, 24.
- [18] 雷维嘉, 周 洋, 谢显中, 等. MIMO 全双工双向安全通信系统的预编码矩阵设计 [J]. 通信学报, 2020, 41 (10): 156-171.
- [19] 王文益, 龚 婧, 王金铭. 基于 SCB 方差的 GNSS 欺骗式干扰检测算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (8): 2254-2262.
- [20] 李 果, 文 妮, 宫丰奎, 等. 部分频带干扰下的 OFDM 系统干扰检测与分集抑制算法 [J]. 通信学报, 2021, 42 (9): 194-204.
- [21] 许晋彰, 景乃锋, 蒋剑飞. 一种面向多处理器互连的高速串行传输系统设计 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37 (8): 16-20, 26.
- [22] 刘建成, 郝学坤, 王赛宇, 等. 信道突变对正交调制传输性能影响的分析方法 [J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (6): 49-54, 60.
- [23] 李玉亭. 云计算环境下分布式大数据多信道并行控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 116-119, 134.
- [24] 张定华, 胡祚波, 曹国彦, 等. 面向工业网络通信安全的数据流特征分析 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38 (1): 199-208.
- [11] 黄新波, 等. 基于 GSM SMS 的输电线路覆冰在线监测系统 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (5): 72-76.
- [12] 范伟平, 等. 输电线路导线舞动在线监测系统设计 [J]. 系统解决方案, 2013, 34. (1): 34-36.
- [13] 李 俊, 李峰纲, 高兴利. 基于交互规则建模的信息系统实时状态监测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (10): 12-17.
- [14] 周 鑫, 段正坤, 邱子祐, 等. 智能视频监控平台在能源行业的应用研究 [J]. 科技创新导报, 2018, 15 (30): 90, 92.
- [15] 张继平, 刘直芳. 视频中运动目标的实时检测和跟踪 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (11): 1036-1039, 1051.
- [16] 李君章. 输电线路张力架线实用技术与计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [17] 崔吉峰. 架空输电线路作业/危险点、危险因素及预控措施手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [18] 李 立, 王 鹏, 廖琳芸, 等. 基于虚拟仪器的多参量传感器信号采集系统的设计 [J]. 计算机自动测量与控制, 2001, 9 (6): 67-68.
- [19] 秦 剑, 夏拥军. 基于分段悬链线理论的悬索分析矩阵迭代法 [J]. 工程设计学报, 2013, 20 (5): 404-408.
- [20] 秦 剑, 刘 晨, 齐志强, 等. 基于悬链线法的张力放线连续过程计算方法及工程试验 [J]. 南方电网技术, 2021, 15 (6): 36-42.