

文章编号: 2095-2163(2022)07-0172-06

中图分类号: TP393

文献标志码: A

# 基于 MPUDP 的多链路信道分配协议设计与实现

王 卉, 占 敖, 吴呈瑜, 夏雨峰

(浙江理工大学 信息学院, 杭州 310018)

**摘要:** 在如今网络直播爆发的时代背景下, 传统的常规用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 存在链路性能不稳定、可靠性低、高延时等问题, 而多链路并行传输是克服该问题的重要技术途径之一。本文基于 UDP 传输协议设计了一种多路径协作传输协议, 即 MPUDP (Multi-path User Datagram Protocol)。协议通过数据训练对每条信道的丢包率、RTT 和乱序情况进行实时监测, 对每条路径是否参与传输进行管理, 并且对传输路径进行速率分配, 有效改善系统的传输带宽。仿真结果表明: 本文提出的多路径协作传输协议相比于 UDP 传统协议, 在相同的误码率情况下, 带宽近似扩大链路数目的倍数, 与 MPTCP 协议相比, 在损失丢包率 0.1% 的情况下, 带宽提升了链路数量倍的吞吐量。

**关键词:** UDP; 速率分配; 多路径; 协作传输

## Design and implementation of multi-link channel allocation protocol based on MPUDP

WANG Hui, ZHAN Ao, WU Chengyu, XIA Yufeng

(School of Information and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**[Abstract]** In the current era of webcasting, the traditional user datagram protocol (User Datagram Protocol, UDP) has lots of problems such as unstable link performance, low reliability, and high latency. Multi-link parallel transmission is one of the important technical approaches which can overcome these problems. Based on the UDP transmission protocol, a multi-path cooperative transmission protocol called MPUDP (Multi-path User Datagram Protocol) is designed. The protocol uses data training to monitor the packet loss rate, RTT and disorder of each channel in real time. The participation of path in the transmission management and the transmission path rate are allocated, which effectively improves the transmission bandwidth of the system. The simulation results show that compared with the traditional UDP protocol, the bandwidth is expanded about a multiple of the number of links when MPUDP protocol has the same bit error rate. Compared with the MPTCP protocol, when the loss of packet loss rate is 0.1%, the bandwidth is increased by nearly multiple links times.

**[Key words]** UDP; cooperative distribution; multi-path; cooperative transmission

## 0 引言

随着无线通信技术和互联网技术的快速发展, 流媒体直播应用得到了迅速的推广普及。与此同时, 在极致的视觉体验的背后, 需要对海量的视频数据进行快速、准确的传输, 传统的流媒体传输协议已经满足不了对于低延时、高画质的要求。

在传统 TCP 协议的基础上, 文献[1]提出了 MP-TCP (Multi-path TCP) 协议, 该协议通过拥塞控制、数据调度技术来实现系统高吞吐量传输的要求; 文献[2]提出了流控制传输协议 (Stream Control Transmission Protocol, SCTP), 其是一种在网络连接之间同时传输多个数据流的协议, 该协议的特点是

安全性高并支持多数据流服务。

为了满足无误码传输要求, MPTCP 设计了数据调度、重传等复杂机制, 一方面增加了协议的复杂度, 另一方面影响了系统带宽, 对于允许少量的丢包, 要求高带宽的音视频数据传输系统是不合适的。然而, UDP 协议通过有限次的重传机制保证数据传输的丢包率, 相比 MPTCP, 能够简化系统传输机制, 提升系统传输带宽; 文献[3]提出了基于 UDP 的传输协议, 在较小的网络开销下, 继承了 UDP 传输实时性的同时, 保证了数据的可靠传输性。针对大数据量的信息传输, 文献[4]提出了一种既能满足 UDP 高效性又能降低网络丢包率和延时的协议, 在提高可靠性的基础上又满足了实时性的需求。UDP

**基金项目:** 国家自然科学基金(61801430); 省自然科学基金(LY18F010022)。

**作者简介:** 王 卉(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 多路径传输、无线网络编码; 占 敖(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 协同通信、无线网络编码、多中继网络容量分析。

**通信作者:** 占 敖 Email: zhanao1983@zstu.edu.cn

**收稿日期:** 2022-01-05

协议在可靠性和实时性上已经取得了较好的成果,但这些方案都是以单链路传输为背景,利用 UDP 协议将多链路协同通信运用在数据传输的研究更是一个全新的方向。

### 1 应用场景

本文提出的 MPUDP 协议是一种基于 UDP 多链路协同通信的协议,实现多条路径协作传输数据。在此过程中,通过真实数据训练评估实时的信道状

态信息,对每条路数的数据传输进行管理,达到扩大系统传输带宽的目的,其应用模型如图 1 所示。多个用户端将视频数据推流到聚合推流设备,紧接着发送端(聚合推流设备)与接收端(聚合服务器)建立多个信道的连接,MPUDP 协议在异构网络环境下对不同的信道分配不同的数据量,其异构网络包括 WiFi、4G、5G 等多路网络环境。聚合服务器汇集多路数据,有序发送到用户服务器,客户端发出拉流请求,实现在线直播观看的功能。

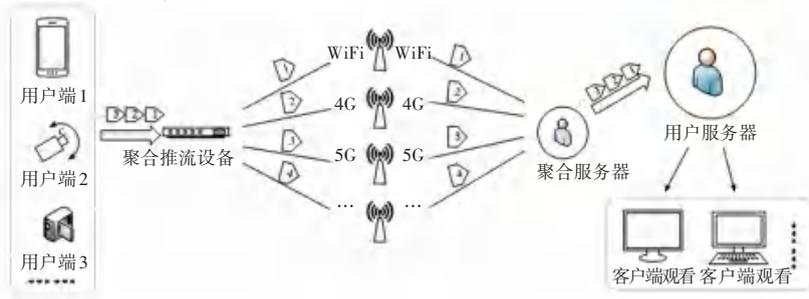


图 1 系统应用模型

Fig. 1 System application scenarios

### 2 系统模型

MPUDP 协议是面向连接的数据报协议,与传统的 UDP 协议不同,MPUDP 协议在兼容 UDP 协议的基础上,支持以多路径数据传输的方式,并根据信道性能分配速率,实现信道的高效传输。MPUDP 系统在发送端和接收端之间存在多条路径,首先确立发送端和接收端的握手连接,然后发送真实数据进行信道训练,来获得信道状态信息,并且根据信道信息

进行速率分配。当接收端出现数据丢包现象,重传机制保证可靠性。如果当信道连接过程中出现连接错误,需要将数据调度到其他信道继续传送,最后聚合多路数据后统一排序组合,得到最后的数据帧。由此可见,MPUDP 的关键工作组件包括训练机制、速率分配、数据调度、重传机制,如图 2 所示。通过这 4 种工作组件,设计出满足负载均衡原则和可靠性原则的 MPUDP 协议。

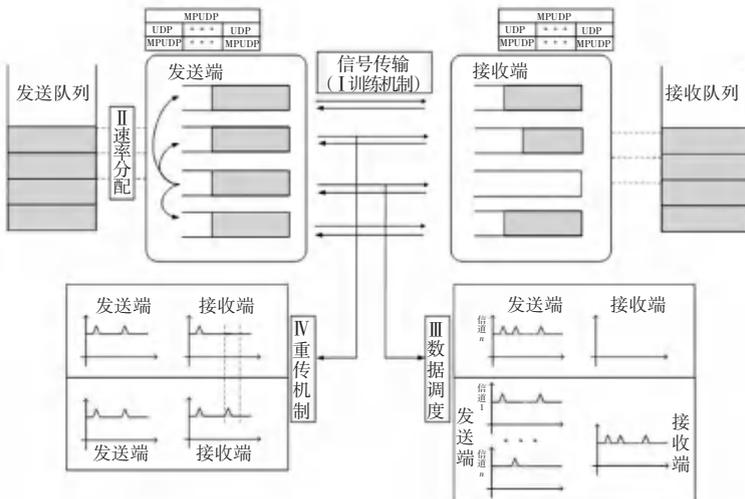


图 2 MPUDP 的系统模型

Fig. 2 MPUDP system model

负载均衡原则:

(1)利用训练机制在数据传输的过程中实时监控链路性能;

(2)利用速率分配原则,根据训练结果动态调整链路的数据占比,减少不同信道对系统实时性的影响。

可靠性原则:

(1)利用数据调度在信道连接中断时切换数据传输的信道;

(2)利用重传机制从根源上降低丢包率。

### 3 协议设计

本文设计 MPUDP 协议主要目标是解决由某条链路负载过大等原因引起的链路性能等问题,然而协议能否具有可靠性和低延时的特性,主要取决于以下4种工作组件,分别为训练机制、速率分配、数据调度、重传机制。

表2 训练信号包结构

Tab. 2 Structure of training signal package

Length	Equip_serial	PacketType	Round	Frame_Length	Frame_train_Length	Frame_train_
IP_Id	IP_Num	Channel_Length	Sequence		Channel_Sequence	
			IP			
			Port			

其中,训练数据回复包的帧结构见表3。

Loss\_Len:丢包数量;Num\_Loss:丢包序列号,每两个Byte表示一个序列号;SeqV:接收数据排序值。

表3 训练回复包结构

Tab. 3 Structure of training reply package

Length	Equip_serial	PacketType	Round	Ip_Num	Ip1
		Port1			
		Loss_Len			
		Num_Loss			
		SeqV			
		CRC			

### 3.2 工作机制

4种工作机制原理设计及功能显示各不相同。

#### 3.2.1 训练机制

MPUDP 算法协议的基础就是训练机制,训练机制的目的是检测各链路的信道性能。

首次发送训练信号,该信号为确定的模拟信号,利用已知信号对未知信道进行快捷的信道质量评估。在数据传输过程中,训练序列为实际的媒体数据,利用边发送媒体数据边训练信道的机制来提升实时信道传输性能。发送端发送数据给接收端,接

### 3.1 协议的系统变量

MPUDP 协议定义了一系列的数据包和字段,为了说明设计思路,将用到的数据包和重要字段加以说明,见表1。

表1 数据包含义描述

Tab. 1 Packet meaning description

数据包名称	数据包含义	数据包作用
$S_{link}$	数据请求包	建立收发连接请求
$S_{train}$	训练信号	监测链路性能请求
$S_{num}$	数据信号	发送真实数据请求
$S_{trainnum}$	发送数据+训练信号	数据监测链路请求
$S_{stop}$	数据包停止请求	信道停止发送请求

其中,训练数据包的帧结构见表2,Channel\_Length:信道发送数据长度;Frame\_Length:发送帧长数据,表示一帧数据包包括多少个数据信号 $S_{num}$ ,最大值为2047,如果出现2047,则丢弃数据包;Sequence:添加数据序列,保证为:0、1、...,Channel\_Length。

收端返回接收时间、丢包率 $e$ 和数据顺序 $R$ 到发送端,发送端根据接收完毕时间和发送时间计算得到RTT,按照信道的丢包率 $e$ 和数据顺序 $R$ 以及往返时延RTT三要素判断信道性能,并将信道分为5个等级,信道性能从好到差依次为 $C_e$ 、 $C_g$ 、 $C_f$ 、 $C_p$ 、 $C_w$ ,见表4。

表4 信道等级分类标准

Tab. 4 Standard of channel classification

丢包率	RTT	数据顺序	等级
0%	$< t_1$	$R < a * L$	$C_e$
0%	$< t_2$	不做要求	$C_g$
$0% < e \leq d_1$	不做要求	不做要求	$C_f$
$d_1 < e \leq d_2$	不做要求	不做要求	$C_p$
$e > d_2$	不做要求	不做要求	$C_w$

其中, $L$ 表示数据长度; $a$ 为判定的加权因子; $t_1$ 、 $t_2$ 为规定完成数据的时间差( $t_1 < t_2$ ); $d_1$ 、 $d_2$ 为特定丢包率数值( $d_1 < d_2$ )。当按序接收时,则 $R$ 表示为式(1):

$$R = |2 - 1| + |3 - 2| + \dots + |L - (L - 1)| = L - 1 \tag{1}$$

按照表4的分类标准对信道性能分类,依据训

练结果对不同等级的信道进行数据包分配,为下一步速率分配提供基础。

### 3.2.2 速率分配

MPUDP 算法协议的核心就是速率分配策略,利用对多路径链路传输的信道性能进行速率分配,实现链路之间数据传输量的“动态”平衡<sup>[5]</sup>。发送端采用多链路开发,优化通信流程,随时尝试在多条路径之间保持负载均衡。

发送训练信号后,若信道被判定为同一等级的情况,按信道数量等额分配数据包;若信道判定为不同信道性能等级,采用差额速率分配数据,提高数据传输的吞吐量。当最差信道被判定为  $C_w$  标准时,传输系统停止该信道的数据传输;当最差信道被判定为  $C_p$  标准时,信道性能归一化速率  $v_x$  表示为式(2):

$$v_x = \frac{z}{2^3 * x_e + 2^2 * x_g + 2^1 * x_f + 2^0 * x_p} \quad (2)$$

$$\text{其中, } z = \begin{cases} 2^3, & \text{当前信道等级 } C_e \\ 2^2, & \text{当前信道等级 } C_g \\ 2^1, & \text{当前信道等级 } C_f \\ 2^0, & \text{当前信道等级 } C_p \end{cases}$$

$x_e$  表示等级为  $C_e$  的信道数量,以此类推; $x_g$ 、 $x_f$ 、 $x_e$  分别表示等级为  $C_g$ 、 $C_f$ 、 $C_e$  的信道数量; $Z$  表示的是各类信道等级的权重。当最差信道被判定为  $C_f$  标准时,信道性能归一化速率  $v_x$  表示为式(3):

$$v_x = \frac{z}{2^2 * x_e + 2^1 * x_g + 2^0 * x_f} \quad (3)$$

$$\text{其中, } z = \begin{cases} 2^2, & \text{当前信道等级 } C_e \\ 2^1, & \text{当前信道等级 } C_g \\ 2^0, & \text{当前信道等级 } C_f \end{cases}$$

若最差信道性能降为  $C_g$  标准,则信道性能归一化速率  $v_x$  表示为式(4):

$$v_x = \frac{z}{2^1 * x_e + 2^0 * x_g} \quad (4)$$

$$\text{其中, } z = \begin{cases} 2^1, & \text{当前信道等级 } C_e \\ 2^0, & \text{当前信道等级 } C_g \end{cases}$$

在训练的过程中,当出现未达要求的信道在训练时通过了信道训练要求,即达到  $C_e$ 、 $C_g$  标准时,增加 10% 的速率在该信道传输,并在下一轮的训练中,加入该信道协作调整最差信道,达到信道性能,实现闭环提升的功能<sup>[6]</sup>。

### 3.2.3 数据调度

在数据传输过程中链路发送端处在训练信号

$S_{\text{train}}$ 、数据信号  $S_{\text{num}}$  和发送数据+训练信号  $S_{\text{trainnum}}$  过程中,链路出现中断情况时,进一步影响链路的可靠性和传输速率。

为保证链路数据的传输速率,需要在链路中启用数据调度的工作机制,将发送在异常链路的数据分发到其他链路中。具体实现:发送过程中当出现数据帧链路错误,MPUDP 协议将未传输数据包分配到其他良好信道上传送,其速率分配遵循上述的速率分配原则。例如:数据传输时有 3 个并行信道,分别为  $C_e$ 、 $C_g$  和  $C_f$ ,在信道传输过程中,信道  $C_f$  发生错误,数据调度将其数据速率分配到其他信道中。在信道没有发生错误的情况下,各信道按照式(5)原则:

$$V_e + V_g + V_f = 1 \quad (5)$$

其中,  $V_e$  表示信道  $C_e$  的分配速率;  $V_g$  表示信道  $C_g$  的分配速率;  $V_f$  表示信道  $C_f$  的分配速率。

当信道  $C_f$  连接断开,信道  $C_e$  和  $C_g$  归一化传输速率为公式(6):

$$\begin{cases} V_e^* = \frac{V_e}{V_e + V_g} \\ V_g^* = \frac{V_g}{V_e + V_g} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $V_e^*$  表示信道  $C_e$  因数据调度得到的新分配速率,  $V_g^*$  表示信道  $C_g$  因数据调度得到的新分配速率。

此时,  $C_e$ 、 $C_g$  两信道帮助断开信道  $C_f$  成功发送该数据帧。以该方法为核心,数据调度可以避免断开链路的丢包率,从而加强信道传输的可靠性。

### 3.2.4 重传机制

在数据传输阶段,如果信道出现丢包现象,该机制能够有效减少丢包率,提高数据可靠性。

在信道连接过程中,与 TCP 协议握手机制类似,MPUDP 协议通过 3 次握手的机制建立连接,区别在于 MPUDP 协议收发两端需要确认双方的 IP 地址及端口号<sup>[5]</sup>。在发送数据过程中,发送端将每包数据连续编号,接收端建立缓冲区,对接收数据包重新进行序号排列。如果接收端检测到没有丢包,则按照数据序号全部移出缓存区;如果接收端检测到丢包,接收端将未接收到的数据包信息(即丢包数量 Loss\_Len 和丢包序列号 Num\_Loss 数据包)反馈给发送端,发送端重新发送指定的数据信息,并保持丢包数据始终在原本信道上进行重传,最大重传次数为 3 次,超过重传次数,停止该帧信息传输,进

入下一帧数据传输,即允许适当的丢包率来改善系统吞吐量,此重传机制适用于海量数据传输,如:音视频传输系统。

以上4种工作组件设计成一种兼具可靠性和数据传输效率的MPUDP协议,并在系统的发送和接收的过程也充分利用了上述4种工作组件。

### 3.3 协议的实现

MPUDP协议是一种提供可靠机制、面向连接的

表5 MPUDP的协议算法设计

Tab. 5 Protocol design of MPUDP

算法1 MPUDP协议设计
输入: Array 数组, $n$ 数据长度
输出: Array 数组
1: 信道连接; 发送端发送数据请求包。
2: 进行3次握手, 接收到ACK→连接成功。
3: 未接收到ACK→连接失败。
4: 训练信道; 发送训练信号。
5: 根据训练的丢包率, 往返时延和排序情况→信道等级。
6: 数据发送; 发送数据信号 $Array[i]$ 。
7: 根据信道等级多链路发送数据, 若在过程出现丢包现象进行重传、重传失败, 返回步骤4-5, 若出现链路链接失败, 则进行数据调度。
8: 数据发送并训练信道: 发送数据+训练信号 $Array[i]$ 。
9: 根据信道等级多链路实时调整发送数据比例, 若出现丢包和链路连接失败, 和步骤7一致。
10: 如果在训练过程中, 有信道质量提升满足条件, 在发送数据端增加信道。
11: 当数据信号序列 $i < n$ 时, 返回步骤6-9, 直到数据信号序列 $i = n$ 。
12: 数据发送停止, 循环结束。

## 4 仿真实验与分析

实验仿真环境的搭建为: 实验室有线路由器与交换机通过网线相连, 无线路由器与有线路由器通过网线相连, 有线路由器可对无线路由器设置不同的传输带宽, 两客户端与无线路由器进行无线信道连接, 服务端电脑与有线路由器通过光纤连接。为评估设计系统的可靠性与高效性, 需利用仿真环境实现基于MPUDP协议在多种情况下的网络传输的实验仿真。为研究多链路协同传输, 在两条传输链路中分别采用UDP和MPUDP传输协议, 两台电脑作为客户端A、B分别使用UDP、MPUDP协议协同传输同一份大文件, 客户端C作为接收端, 接收两客户端发送过来的文件。

UDP协议是传统流媒体服务器协议; MPTCP协议表示多链路数据传输协议; MPUDP是本文设计的多路径协作传输协议, 3种通信协议对实时链路带宽的吞吐量, 如图3所示。MPUDP协议在进行数据传输时, 与UDP、MPTCP协议相对比, 吞吐量在不同丢包率情形下都有不同程度的提高。在丢包率为

数据流传输协议。MPUDP的协议算法设计见表5, MPUDP的4种工作机制建立起多路径传输以及如何实现数据包的合理分配的过程。发送端分别发送数据请求包, 训练信号和数据信号, 接收端对多条发送结果进行反馈, 并不断通过训练情况实时提升信道传输速率。

0%的情况下, MPUDP协议由于自身的协作特性, 在满足要求的情况下, 能够实现较高的吞吐量; MPTCP协议由于协议高精度度的要求, 必须满足0%的丢包率, 但由于协议特性缺少自适应的算法, 在吞吐量上不敌MPUDP协议; 在丢包率为0%的情况下, UDP协议的吞吐量最低, 而随着丢包率要求的降低, UDP和MPUDP协议的吞吐量也在稳步提升。

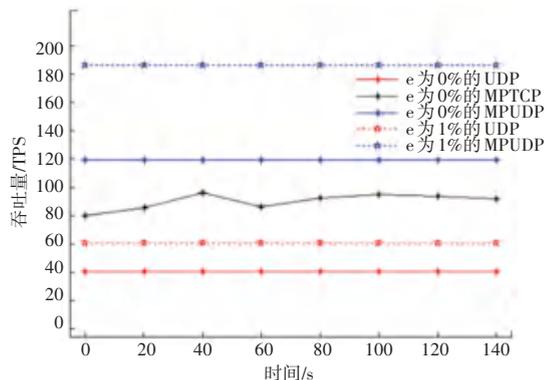


图3 模拟信道在不同算法协议下的吞吐量

Fig. 3 Throughput of analog channel under different algorithm protocols

MPUDP 协议和 UDP 协议在不同丢包率要求下的吞吐量如图 4 所示,在 MPUDP 协议中,运用了多链路协作传输,这相比于 UDP 的单信道传输在信道传输速率上有了近链路数目倍的增长。

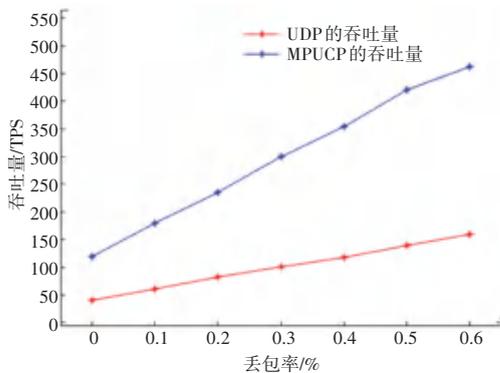


图 4 模拟信道在不同丢包率情况下的吞吐量

Fig. 4 Throughput of analog channel under different packet loss rate

## 5 结束语

本文分别对 MPUDP 训练机制、速率分配、重传机制、数据调度进行了设计及优化。通过训练获得

(上接第 171 页)

## 4 结束语

本文设计的脊髓损伤康复治疗方案决策的 UPE-SVM 推理模型,有效解决了采用医疗数据集训练模型时,经常出现的样本类别不平衡问题,并在测试集上取得较好的效果,提高了康复治疗方案决策的准确率。这种技术的应用有望帮助解决脊髓损伤患者的康复治疗方案决策的不足,同时对其它中小型复杂数据集的多标签分类任务有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] SEONG K H, KILBYUNG L, JIYONG K, et al. Epidemiology of Spinal Cord Injury: Changes to Its Cause Amid Aging Population, a Single Center Study [J]. *Annals of rehabilitation medicine*, 2021, 45(1):7.
- [2] 施龙保,唐佩福.急性脊髓损伤概述[J].*中国卫生标准管理*, 2017, 8(10): 65-68.
- [3] 李晞,吴小高.我国残疾人辅助器具服务工作的现状及展望[J].*残疾人研究*, 2016(3): 43-47.
- [4] DANKEL D D, KRISTMUNDSDÓTTIR M Ó. REPS: a rehabilitation expert system for post-stroke patients [C]// *Conference on Artificial Intelligence in Medicine in Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005: 94-98.

每条链路信道传输带宽进行数据分配传输,达到多条链路协作传输视频的能力。在允许少量丢包的情况下,改善系统数据的传输带宽,适用于音视频传输的应用场景。实验仿真表明:在丢包率较小的情形下,MPUDP 协议相较于 UDP 协议在模拟信道的吞吐量上都有了近链路数目倍的增长。

## 参考文献

- [1] CONINCK Q D, BAERTS M, HESMANS B, et al. Observing real smartphone applications over multipath TCP [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(3):88-93.
- [2] 王敏,黄战华,王铨.具有容错机制的改进型 UDP 协议[J].*光电工程*, 2011, 38(3):88-94.
- [3] 白正,柳登丰,孙文俊.基于 UDP 的报文可靠传输技术研究[J].*网络安全技术与应用*, 2013, 5:34-36.
- [4] 郭黎,苏新,王磊.基于 FPGA 的太赫兹高速 MAC 协议设计与实现[J].*无线电通信技术*, 2021, 47(1):51-56.
- [5] 龙恒.一种基于 UDP 的可靠数据传输协议[J].*计算机时代*, 2020(4):33-37
- [6] LIU Xunwei, SHAN Liang, CHEN Hao, et al. The application of the improved UDP based on the extrapolation algorithm in the network servo system[J]. *2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*.2016:1913-1918.
- [5] ALEXANDRA D-S, TSVI K, L W P, et al. Effectiveness of a Clinical Decision Support System for Pointing Device Prescription [J]. *The American journal of occupational therapy : official publication of the American Occupational Therapy Association*, 2015, 69(2):1-7.
- [6] VAPNIK V. *The nature of statistical learning theory* [M]. Springer science & business media, 1999.
- [7] 董春曦,饶鲜,杨绍全.支持向量机参数选择方法研究[J].*系统工程与电子技术*, 2004(8): 1117-1120.
- [8] WANG H, XU D, MARTINEZ A. Parameter selection method for support vector machine based on adaptive fusion of multiple kernel functions and its application in fault diagnosis [J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(3):183-193.
- [9] 赵丹. SVM 核函数与选择算法 [J]. *数字技术与应用*, 2014, (9): 226.
- [10] 杨智勇.面向复杂场景的 AUC 优化理论、方法及应用[D].中国科学院大学, 2021.
- [11] BRADLEY A P. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms [J]. *Pattern recognition*, 1997, 30(7): 1145-1159.
- [12] 姚佳奇,徐正国,燕继坤,等. WPLoss:面向类别不平衡数据的加权成对损失 [J]. *计算机应用研究*, 2021(3): 702-704,709.
- [13] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection [C]// *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2017: 2980-2988.
- [14] CHAWLA N V, BOWYER K W, HALL L O, et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique [J]. *Journal of artificial intelligence research*, 2002, 16: 321-357.