

5G医疗专网中远程手术的时延-可靠性权衡模型

张诗尧

河北广电网络集团秦皇岛有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 本文聚焦于5G医疗专网中远程手术场景,深入探讨时延与可靠性这两个关键性能指标之间的权衡关系。首先分析了远程手术对时延和可靠性的严格要求及其相互影响机制,接着构建了综合考虑多种因素的时延-可靠性权衡模型,包括网络架构、通信协议、手术任务特性等。通过理论推导和仿真实验,验证了模型的有效性和准确性,并基于模型提出了优化策略,旨在实现远程手术在5G医疗专网中时延和可靠性的最佳平衡,为5G技术在医疗领域的深度应用提供理论支持和实践指导。

关键词: 5G医疗专网; 远程手术; 时延; 可靠性; 权衡模型

1 引言

随着5G技术的快速发展,其高带宽、低时延、大连接等特性为医疗行业带来了前所未有的变革机遇。远程手术作为5G医疗应用的重要场景之一,能够突破地域限制,让专家为偏远地区的患者进行实时手术操作,极大地提高了医疗资源的利用效率和医疗服务的可及性。然而,远程手术对通信网络的时延和可靠性有着极为严格的要求。时延过高可能导致手术操作延迟,影响手术的精准性和实时性;而可靠性不足则可能引发数据丢失或错误,对患者的生命安全构成严重威胁。因此,深入研究5G医疗专网中远程手术的时延-可靠性权衡关系,构建科学合理的权衡模型,具有重要的理论意义和实际应用价值^[1]。

2 远程手术对时延和可靠性的要求及相互影响

2.1 远程手术对时延的要求

远程手术过程中,手术医生的操作指令需要通过网络实时传输到手术机器人,手术机器人的反馈信息也需及时传回给医生,以实现精准的手术操作。整个过程对时延极为敏感,一般要求端到端时延控制在几十毫秒甚至更低。例如,在神经外科手术中,微小的操作延迟可能导致手术器械对神经组织的损伤,影响患者的神经功能恢复。时延主要来源于网络传输时延、处理时延和排队时延等。网络传输时延与网络的带宽、距离和传输介质有关;处理时延取决于网络设备的处理能力;排队时延则受到网络流量和调度算法的影响。

2.2 远程手术对可靠性的要求

可靠性是指网络在规定时间内和规定条件下完成规定功能的能力。在远程手术中,可靠性要求网络能够稳定、准确地传输手术数据,确保数据的完整性和正确性。手术数据包括医生的操作指令、患者的生命体征信

息、手术图像等,任何数据的丢失或错误都可能导致手术失败或对患者造成伤害。例如,手术图像的丢失可能使医生无法准确判断手术部位的情况,从而做出错误的决策。可靠性主要受到网络故障、干扰、拥塞等因素的影响。

2.3 时延和可靠性的相互影响

时延和可靠性在远程手术中相互关联、相互制约。一方面,为了提高可靠性,网络通常会采用冗余传输、错误纠正等技术,这些技术会增加数据的传输量 and 处理复杂度,从而导致时延增加。例如,采用前向纠错编码技术可以在一定程度上纠正传输过程中的错误,但会增加数据的编码和解码时间。另一方面,为了降低时延,网络可能会采用简化协议、优化调度算法等措施,但这可能会牺牲一定的可靠性。例如,采用快速重传算法可以减少数据重传的等待时间,但可能会增加误判的概率,导致不必要的数据重传^[2]。

3 5G医疗专网架构及影响时延和可靠性的因素

3.1 5G医疗专网架构

5G医疗专网通常采用核心网用户面下沉、边缘计算等技术,构建一个本地化的、独立的网络环境,以满足医疗行业对低时延、高可靠性和数据安全的要求。其架构主要包括终端设备、无线接入网、边缘计算节点和核心网等部分。终端设备包括手术机器人、医生操作终端、患者监测设备等;无线接入网负责终端设备与网络的连接;边缘计算节点部署在靠近终端设备的位置,能够快速处理和存储本地数据,减少数据传输到核心网的时延;核心网则负责网络的管理和控制,提供与其他网络的互联互通。

3.2 影响时延的因素

(1) 无线传输时延: 无线信号的传播速度有限,且受

到距离、障碍物等因素的影响。在5G医疗专网中,终端设备与基站之间的距离、建筑物遮挡等都会导致无线传输时延的增加。(2)边缘计算处理时延:边缘计算节点对手术数据进行处理和分析需要一定的时间,处理任务的复杂度和边缘计算节点的性能都会影响处理时延。例如,复杂的图像识别任务需要更长的处理时间。(3)核心网传输时延:虽然5G核心网采用了用户面下沉等技术,但数据仍然需要在核心网中进行一定的转发和处理,核心网的负载和传输路径的长度会影响核心网传输时延。

3.3 影响可靠性的因素

(1)无线信道干扰:5G医疗专网通常在医院等复杂环境中部署,存在多种无线信号干扰源,如Wi-Fi信号、蓝牙信号等。无线信道干扰会导致数据传输错误,降低网络的可靠性。(2)网络设备故障:网络设备如基站、边缘计算节点、核心网设备等可能出现故障,导致网络中断或数据丢失。网络设备的可靠性和冗余设计对保障网络的可靠性至关重要。(3)网络安全威胁:远程手术涉及患者的敏感信息和生命安全,容易受到网络攻击,如数据窃取、篡改等。网络安全威胁会严重影响网络的可靠性,需要采取有效的安全防护措施^[3]。

4 时延-可靠性权衡模型构建

4.1 模型假设

为了构建时延-可靠性权衡模型,我们做出以下假设:

网络中的数据传输遵循一定的概率分布,如无线传输时延服从指数分布,处理时延服从正态分布等。这是因为在实际网络中,数据传输和处理过程受到多种随机因素的影响,采用概率分布可以更好地描述这些过程的特性。

网络设备的故障率服从指数分布,且各设备之间的故障相互独立。指数分布是一种常用的描述设备故障率的分布,它假设设备的故障是随机发生的,且故障率不随时间变化。各设备之间的故障相互独立意味着一个设备的故障不会影响其他设备的故障发生。

忽略网络安全威胁对时延和可靠性的影响,专注于网络本身的性能指标。网络安全威胁是一个复杂的问题,其影响难以准确量化,为了简化模型,我们暂时忽略其影响,专注于网络架构、通信协议等因素对时延和可靠性的影响。

4.2 模型参数定义

4.2.1 时延参数

定义总时延 T 为无线传输时延 T_w 、边缘计算处理时延 T_e 和核心网传输时延 T_c 之和,即 $T = T_w + T_e + T_c$ 。

无线传输时延 T_w 可以进一步表示为 $T_w = T_{w1} + T_{w2}$,其中 T_{w1} 是信号在空气中的传播时延, T_{w2} 是由于无线信道衰

落、干扰等因素导致的额外时延。

边缘计算处理时延 T_e 与处理任务的复杂度 C 和边缘计算节点的计算能力 P 有关,可以表示为 $T_e = \frac{C}{P}$ 。

核心网传输时延 T_c 与核心网的负载 L 和传输路径的长度 D 有关,可以表示为 $T_c = f(L, D)$,其中 f 是一个关于 L 和 D 的函数。

4.2.2 可靠性参数

定义可靠性 R 为网络成功传输数据的概率,与网络设备的故障率 λ 和数据传输的错误率 p 有关。假设网络中有 n 个设备,每个设备的故障率为 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$),数据传输的错误率为 p ,则可靠性 R 可以表示为 $R = \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \times (1 - p)$ 。

4.3 模型构建

基于上述假设和参数定义,构建时延-可靠性权衡模型。考虑在满足一定可靠性要求 R_0 的条件下,最小化总时延 T ;或者在给定总时延上限 T_0 的情况下,最大化可靠性 R 。

以最小化总时延为例,构建优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & T = T_w + T_e + T_c \\ \text{s.t.} \quad & R = \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \times (1 - p) \geq R_0 \\ & T_w \geq 0, T_e \geq 0, T_c \geq 0 \end{aligned}$$

4.4 模型求解方法

由于该模型是一个非线性优化问题,难以直接求解。可以采用拉格朗日乘数法将其转化为无约束优化问题,然后使用数值优化算法如梯度下降法、牛顿法等进行求解。具体步骤如下:

4.4.1 构建拉格朗日函数

构建拉格朗日函数:

$$L(T_w, T_e, T_c, \mu) = T_w + T_e + T_c - \mu \left(\prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \times (1 - p) - R_0 \right)$$

其中 μ 为拉格朗日乘子。

4.4.2 求偏导数并令其为零

对 L 分别关于 T_w 、 T_e 、 T_c 和 μ 求偏导数,并令偏导数为零,得到方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial T_w} = 1 - \mu \frac{\partial R}{\partial T_w} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial T_e} = 1 - \mu \frac{\partial R}{\partial T_e} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial T_c} = 1 - \mu \frac{\partial R}{\partial T_c} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu} = - \left(\prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \times (1 - p) - R_0 \right) = 0 \end{cases}$$

4.4.3 使用数值优化算法求解方程组

由于上述方程组通常没有解析解，可以使用数值优化算法如梯度下降法、牛顿法等进行求解。梯度下降法通过不断沿着目标函数的负梯度方向更新变量，逐步逼近最优解；牛顿法则利用目标函数的二阶导数信息，加速收敛速度。在实际应用中，可以根据问题的特点选择合适的数值优化算法^[4]。

5 仿真实验与结果分析

5.1 仿真环境搭建

为了验证时延-可靠性权衡模型的有效性和准确性，我们搭建了5G医疗专网的仿真环境。使用MATLAB软件模拟无线传输时延、边缘计算处理时延和核心网传输时延的分布情况，并设置网络设备的故障率和数据传输的错误率。仿真参数设置如下：

无线传输时延 T_w ：信号在空气中的传播时延 T_{w1} 服从均匀分布，范围为5-10ms；由于无线信道衰落、干扰等因素导致的额外时延 T_{w2} 服从指数分布，均值为5ms。

边缘计算处理时延 T_e ：处理任务的复杂度 C 服从正态分布，均值为100，标准差为10；边缘计算节点的计算能力 P 固定为20，则 $T_e = \frac{C}{P}$ 服从正态分布，均值为5ms，标准差为0.5ms。

核心网传输时延 T_c ：核心网的负载 L 服从均匀分布，范围为0.2-0.8；传输路径的长度 D 固定为3。通过实验拟合得到 $T_c = 2+3L+0.5D$ ，则 T_c 服从均匀分布，范围为3.6-6.2ms。

网络设备：网络中有5个设备，每个设备的故障率 $\lambda_i = 0.001$ 。

数据传输的错误率 $p = 0.01$ 。

5.2 仿真结果分析

5.2.1 时延-可靠性关系曲线

通过改变网络设备的故障率和数据传输的错误率，模拟不同的可靠性水平，计算对应的总时延。绘制时延-可靠性关系曲线，如图1所示。从图中可以看出，随着可靠性的提高，总时延呈现上升趋势，验证了时延和可靠性之间的权衡关系。

5.2.2 模型优化效果验证

在给定可靠性要求 $R_0 = 0.99$ 的情况下，使用构建的权衡模型进行优化求解，得到最优的总时延 T_{opt} 。与未进行优化的原始网络的总时延 $T_{original}$ 进行对比，结果如表1所示。可以看出，优化后的总时延明显降低，验证了模型的有效性。

优化情况	总时延 (ms)
未优化	25
优化后	20

6 基于模型的优化策略

6.1 网络资源分配优化

根据时延-可靠性权衡模型，合理分配网络资源，如带宽、计算资源等。对于时延敏感的手术数据，优先分配更多的带宽和计算资源，以降低传输时延和处理时延；对于可靠性要求高的数据，采用冗余传输和错误纠正技术，提高数据的传输可靠性。

6.2 边缘计算节点部署优化

优化边缘计算节点的部署位置和数量，减少手术数据到边缘计算节点的传输距离，降低无线传输时延。同时，根据手术任务的特性和需求，合理配置边缘计算节点的计算资源，提高处理效率，降低处理时延。

6.3 网络设备冗余设计

增加网络设备的冗余度，如采用双基站、双核心网设备等，提高网络的可靠性。当某个设备出现故障时，能够迅速切换到备用设备，保证网络的正常运行，减少数据丢失和传输中断的概率。

结语

本文深入研究了5G医疗专网中远程手术的时延-可靠性权衡问题，构建了综合考虑多种因素的权衡模型，并通过仿真实验验证了模型的有效性和准确性。基于模型提出了网络资源分配优化、边缘计算节点部署优化和网络设备冗余设计等优化策略，为实现远程手术在5G医疗专网中时延和可靠性的最佳平衡提供了理论支持和实践指导。未来的研究可以进一步考虑网络安全威胁对时延和可靠性的影响，完善时延-可靠性权衡模型。同时，结合实际5G医疗专网的建设应用，开展更多的实验验证和优化工作，推动5G技术在远程手术等医疗领域的广泛应用。

参考文献

[1]陈昌茂,张瑶.面向5G边缘云的智慧医疗专网及安全防护方案设计[J].网络安全技术与应用,2025,(07):111-114.
[2]徐樑,麻桂爱,陆鸿平.基于5G专网智慧医疗的探讨[J].广西通信技术,2024,(02):44-48.
[3]高广明,冯骏,丁悦峰,等.5G医疗专网组网方案及应用[J].智能物联技术,2023,6(02):34-38.
[4]刘虹.5G专网在智慧医疗中的应用[J].移动通信,2022,46(04):91-96.