

# 基于场景需求的6G低时延 高可靠性能指标体系研究

## Research on KPI System of 6G Low-latency and High-reliability Based on Demands

李静,李福昌,张涛(中国联通研究院,北京100048)

Li Jing, Li Fuchang, Zhang Tao (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

### 摘要:

探讨了6G通信技术在极可靠和低延迟通信场景下的关键应用方向和挑战。通过分析典型应用场景,揭示了不同领域对于低时延高可靠性通信的需求,随后提出了构建6G通信系统低时延高可靠性能指标体系的框架,包括网络、服务和辅助性能指标,提出的计量方法为评估通信系统性能提供了实用工具。该研究有望指导未来通信系统的设计、优化和部署,实现更高效、更可靠的通信服务。

### 关键词:

6G;低时延;高可靠

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2024.07.003

文章编号:1007-3043(2024)07-0013-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

It explores the key application directions and challenges of 6G communication technology in scenarios requiring ultra-reliable and low-latency communication. By analyzing typical application scenarios, it reveals the demands for low-latency and high-reliability communication in different domains. Subsequently, it proposes a framework for constructing performance indicators for low-latency and high-reliability in 6G communication systems, encompassing network, service, and auxiliary performance metrics. The proposed measurement methods provide practical tools for evaluating communication system performance. This research is expected to guide the design, optimization, and deployment of future communication systems, enabling more efficient and reliable communication services.

### Keywords:

6G; Low-latency; Ultra-reliable

引用格式:李静,李福昌,张涛. 基于场景需求的6G低时延高可靠性能指标体系研究[J]. 邮电设计技术,2024(7):13-17.

## 0 引言

随着信息技术的飞速发展,通信系统不断演进,从5G演进到6G,6G通信技术将进一步提升通信性能,实现毫秒级以下的超低时延和极高的可靠性,为实时应用和关键任务提供更可靠、更高效的通信连接<sup>[1]</sup>。本文将探讨6G通信技术在极可靠和低延迟通

信场景下的关键应用方向和挑战,旨在深入理解6G通信技术的发展趋势和应用前景。通过对典型应用场景的分析和评估,说明从工业控制到医疗保健的不同领域对低时延高可靠性通信的需求。本文提出了6G通信系统低时延高可靠性能指标体系框架,该框架以网络性能指标、服务性能指标和辅助性能指标为基础,可灵活适应不同场景和应用需求,提供了一个全面的评估方法。通过详细介绍和分析关键指标,为6G通信系统的设计、优化和部署提供了重要参考,有助

收稿日期:2024-05-16

于实现更高效、更可靠的通信服务。

## 1 典型应用场景6G低时延高可靠性需求分析

### 1.1 运动控制

运动控制系统<sup>[2]</sup>负责以确定的方式控制机器的移动和/或旋转部件,如印刷机、机床或包装机。运动控制系统周期性地向1个或多个致动器发送预设的设定值,使致动器相应地执行动作,传感器监测过程的当前状态,如组件位置和/或旋转,并将实际值反馈给运动控制器(见图1)。这一过程严格按照循环和确定性进行,以确保在应用周期内,控制器发送更新的设定值给执行器,并接收传感器的实际值。运动控制的服务性能要求如表1所示。

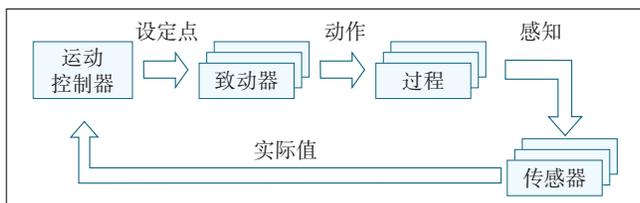


图1 运动控制系统示意

### 1.2 移动控制面板

控制面板<sup>[3]</sup>是与生产机械和移动设备进行交互的关键设备,用于配置、监控、调试、控制和维护机器、机器人、起重机或整条生产线。控制面板通常配有紧急停止按钮和使能装置,以防止安全事件发生时对人员或设备造成损害。紧急停止按钮可以立即将受控设

备置于安全静止状态,而特殊的使能装置模式则可以手动保持设备在安全静止位置。由于这些安全功能的重要性,目前大多数安全控制面板与设备采用有线连接。然而,通过超可靠、低延迟的无线链路连接控制面板可以提高系统的可用性,并且可以灵活地重复使用控制面板来控制不同的机器。控制应用的周期取决于需要确保安全的工艺、机械和设备,例如,对于快速移动的机器人,端到端延迟时间通常要比缓慢移动的线性执行器短。移动控制面板的服务性能要求如表2所示。

### 1.3 分布式能源资源和微电网

分布式能源资源(DER)的重要性日益凸显,潜在的大量DER对能源网络的安全性、稳定性和运行效率<sup>[4]</sup>产生了影响。将DER整合到能源网络中给相关通信系统带来了许多挑战。为了纳入更多的可再生能源和替代能源,通信基础设施必须能够处理不断增加的数据流量或服务请求,并为这些DER提供实时监控操作。DER之间的可靠通信至关重要。

在此背景下,IEC 61850标准规定了变电站中常用信息的时间限制。其中,通用面向对象变电站事件(GOOSE)和采样值(SV)报文被视为时间关键报文,它们具有最短的截止时间,相当于3 ms。GOOSE通常用于传输与监控功能相关的信息,而SV用于传输电流和电压信号的测量样本。SV采用周期性信息传输模式,以固定速率发送信息。出于保护电力系统安全和可靠运行的目的,设置默认的消息传输速率,50 Hz和60

表1 运动控制的服务性能要求

用例#	特性参数				影响量						
	通信服务可用性:目标值/%	通信服务可靠性:平均故障间隔时间	端到端延迟:最大值	服务比特率:用户体验的数据速率	消息大小/B	传输间隔:下限	传输间隔:上限	存活期	UE速度/(km/h)	UE数量	服务区
1	99.999~99.999	大约10年	<传输间隔值	-	50	500 μs~500 ns	500 μs+500 ns	500 μs	≤72	≤20	50 m×10 m×10 m
2	99.999 9~99.999 999	大约10年	<传输间隔值	-	40	1 ms~500 ns	1 ms+500 ns	1 ms	≤72	≤50	50 m×10 m×10 m
3	99.999 9~99.999 999	大约10年	<传输间隔值	-	20	2 ms~500 ns	2 ms+500 ns	2 ms	≤72	≤100	50 m×10 m×10 m

表2 移动控制面板的服务性能要求

使用案例#	特性参数				影响量							
	通信服务可用性:目标值/%	通信服务可靠性:平均故障间隔时间	端到端延迟:最大值	服务比特率:用户体验数据速率	信息大小/B	传输间隔:下限	传输间隔:目标值/ms	传输间隔:上限	生存时间	UE速度/(km/h)	UE数量	服务区
1	99.999 9~99.999 999	~1个月	<目标传输间隔值	-	40~250	目标传输间隔值的75%	4~8	目标传输间隔值的125%	目标传输间隔值	<7.2	待定	50 m×10 m×4 m

Hz 电力系统的默认速率分别为每秒发送 4 000 或 4 800 报文。相比之下,GOOSE 采用零星信息传输模式,保持连续的数据流以提高通信可靠性。GOOSE 和 SV 信息的典型大小分别为 160 B 和 140 B。

GOOSE 报文有 2 种不同的传输模式。安全运行

模式下每秒传输 1 条报文(服务比特率为 1.28 kbit/s),紧急运行模式下每秒传输 32 条信息(服务比特率为 41.0 kbit/s)。SV 信息的传输速率更高,为每秒 4 800 条(服务比特率为 5.4 Mbit/s)。DER 使用 SV 和 GOOSE 消息报文的关键性能如表 3 所示。

表 3 DER 使用 SV 和 GOOSE 消息报文的关键性能

用例#	特征参数				影响量			
	通信服务可用性:目标值/%	通信服务可靠性:平均故障间隔时间	端到端延迟:最大值/ms	服务比特率:用户体验数据速率/(Mbit/s)	信息大小/B	传输间隔:目标值/ms	生存时间	UE 速度
分布式能源和微电网使用 50 Hz 的 SV 消息	99.999 9	-	<3	4.5	140	≤1	传输间隔	固定
分布式能源和微电网使用 60 Hz 的 SV 消息	99.999 9	-	<3	5.4	140	≤1	传输间隔	静止
分布式能源和微电网使用 GOOSE 消息	>99.999 9	-	<3	-	160	-	-	静止

注:假设 UE 到 UE 通信

### 1.4 远程手术

远程手术是一种利用机器人技术和高速通信网络实现的医疗操作方法,旨在解决患者与外科医生地理距离上的限制。这种手术通过复杂的机械系统,将外科医生的手部动作转化为微小的器械动作,从而在远离患者的地方进行精准的外科操作。典型的机器人手术系统设置如图 2 所示,通常包括以下几个组成部分。



图 2 典型的机器人手术系统设置

a) 外科医生控制台。外科医生通过控制台进行手术操作,控制台通过传感器和致动器实时接收和发送数据,提供触觉反馈和图像显示,帮助外科医生进行精细操作。

b) 手术机器人。手术机器人根据控制台发出的命令执行手术操作,机器人配备了多个致动器和传感器,可以精确地完成各种复杂的动作,超越人手的操作能力。

c) 通信网络。通信网络是用于连接外科医生控制台和手术机器人的高速网络。在远程手术的场景中,网络的延迟和可靠性至关重要,必须满足高可用性和低延迟的要求,以确保手术的安全和成功。

d) 触觉反馈系统。触觉反馈系统根据手术器械

的位置、速度、力度等数据,生成适当的触觉反馈,提供给外科医生。这使得医生可以感觉到器械在患者体内的状态,提高操作的精准度和稳定性。

与机器对机器的通信不同,机器人辅助的远程手术意味着控制回路中间有一个人。因此,控制台会根据前一个 1 kHz 周期中收集的系統状态以及外科医生的手部运动生成新命令。机器人远程手术装置中的每台设备都通过外部或 6G 系统提供的通用时钟进行同步。同步通常通过专用协议实现,以确保主控台上的触觉反馈和显示图像的一致性,或者实现整个手术过程的录制和离线重放。运动控制和触觉反馈的服务性能要求如表 4 所示。

a) 用例 1: 机器人辅助手术。在该场景中,外科医生控制台和机器人位于同一手术室,为支持精确的合作机器人的运动控制和触觉反馈,需进行定期通信。

b) 用例 2: 远程手术。在该场景中,定期通信可支持合作机器人的运动控制和触觉反馈。此时,外科医生控制台和机器人不在同一地点,而是通过可能跨越整个国家的 PLMN 建立的连接进行通信。放宽要求意味着,与用例 1 相比,用例 2 可实现的外科手术复杂程度要低得多。值得注意的是,这种用例还涉及更有经验和训练有素的外科医生,他们可以应对通信系统中更长的延迟。

## 2 评估 6G 低时延高可靠的性能关键指标

在构建 6G 通信系统的低时延高可靠性能指标体

表4 运动控制和触觉反馈的服务性能要求

用例 #	特性参数					影响量					
	通信服务可用性:目标值/%	通信服务可靠性:平均故障间隔时间/年	端到端延迟:最大值/ms	比特率/(Mbit/s)	方向	信息大小/B	传输间隔/ms	生存时间	UE速度	激活的UE数量(注)	服务区
1	>99.999 999	>10	<2	2~16	网络至UE; UE至网络	250~2 000	1	转移区间	固定	1个	房间
2	>99.999 9	>1	<20	2~16	网络至UE; UE至网络	250~2 000	1	传输间隔	固定	<20个/100 km <sup>2</sup>	全国

注:为解决 UE 分布不均匀的问题,为大型服务区设置了 UE 密度上限,而为小型服务区设置了 UE 的绝对数量。

系时,应以6G低时延高可靠的需求和场景<sup>[6]</sup>为导向,提供一个跟踪和预测网络性能的指标体系框架,该框架需尽可能考虑6G低时延高可靠的场景和需求,并且能够根据不同场景和应用需求进行灵活调整和扩展。例如,针对高速移动通信场景,可以加强对数据时延和数据丢失率的监测和优化;针对大规模物联网场景,可以优化网络覆盖和传输效率等指标。基于这个思路,6G低时延高可靠的关键指标体系可按照网路性能指标、服务性能指标和辅助性能指标来建立。

### 2.1 网络性能指标

a) 数据时延。数据时延指从节点发送的数据包到达目的地所需的时间。低时延是6G通信系统的重要特征之一,对于实时应用至关重要。该指标可考虑的计量方法如下。

(a) Round-Trip Time (RTT)。RTT是从发送数据包到接收到该数据包的响应所需的时间。通过测量数据包的往返时间,可以估计数据时延。

(b) 单向时延测量。在某些情况下,只需测量从发送端到接收端的单向数据传输时间。这种方法可以更准确地评估数据传输的延迟。

b) 可靠性。可靠性表示在一定的时延内成功传输唯一数据包的概率。6G通信系统需要确保数据的完整传输,以满足高可靠性的应用需求。该指标可考虑的计量方法如下。

(a) Packet Delivery Ratio (PDR)。PDR是衡量成功传输的数据包数量与发送的总数据包数量之间的比率<sup>[7]</sup>。高PDR表示可靠性更高,因为有更多的数据包成功传输到目的地。

(b) End-to-End Delay Variation (Jitter)。网络确定性还可以通过测量数据包到达目的地的时间之间的变化来评估。较低的延迟变化表明网络的可靠性较高,因为数据包的传输延迟相对稳定。

### 2.2 服务性能指标

可用性用来衡量设备或系统持续正常运行的能力,通常以百分比表示<sup>[8]</sup>。6G通信系统需要保证网络设备实现其功能的稳定性,以提供持续可靠的服务,计量可用性的方法如下。

a) 系统运行时间记录。该数据记录了系统运行的时间和停机的时间,可通过这些数据计算系统的可用性。可用性(%)= $\left[ \frac{\text{系统运行时间}}{\text{系统运行时间} + \text{停机时间}} \right] \times 100\%$ 。

b) 故障恢复时间分析。故障恢复时间指系统从故障状态恢复到正常运行状态所需的时间,包括检测故障、诊断问题、修复设备和重新启动系统等步骤。减少故障恢复时间可以提高系统的可用性。

c) 连接稳定性(Connection Stability)。该指标用来评估连接设备之间的稳定性和可靠性,包括连接的建立速度、连接的维持时间、连接的中断率等。稳定的连接可以提高网络的可用性和用户体验。

### 2.3 辅助性能指标

a) 连接密度。连接密度用来衡量网络支持大规模连接和高并发通信的能力,适应于物联网等大规模连接应用场景。

(a) 设备连接数量(Device Connection Count)。设备连接数量记录了网络中同时连接的设备数量。连接密度可以通过统计网络中的活跃设备数量来进行评估,如传感器、终端设备、用户设备等。较高的设备连接数量表示网络能够支持大规模连接应用场景。

(b) 连接设备分布(Device Distribution)。该指标用于分析连接设备在网络中的分布情况<sup>[9]</sup>,包括设备密度、区域覆盖范围等。通过对设备分布的评估,可以确定网络中连接密度较高的区域和区域之间的差异,为网络优化提供参考。

(c) 连接负载(Connection Load)。该指标可衡量连接设备之间的通信负载,包括数据传输量、通信频

率等。连接密度高的区域通常会产生较大的连接负载,需要网络能够有效处理和调度通信资源。

b) 数据速率/数据包大小。通过分析不同场景下数据量的差异,确定合适的传输方式和协议,提高数据传输效率。

(a) 数据传输速率(Data Transmission Rate)。衡量单位时间内传输的数据量。

(b) 数据包大小分布(Packet Size Distribution)。该指标用于分析数据包的大小分布情况<sup>[10]</sup>,包括平均数据包大小、最大数据包大小、数据包大小的方差等。通过分析数据包大小的分布特征,可以了解不同场景下的数据量差异,为选择合适的传输方式和协议提供参考。

c) 移动速度。即使在高速移动的情况下,网络也需确保通信的稳定性,以适应高速移动通信场景。

(a) 速度范围(Speed Range)。通过测量通信系统在不同速度下的性能表现,确定其能够有效支持的最低和最高移动速度,确保通信的稳定性和可靠性。

(b) 切换成功率(Handover Success Rate)。该指标用于衡量移动设备在切换到新的通信基站时,成功完成切换的概率。通过监测切换成功率,可以评估通信系统在高速移动情况下切换性能的稳定性和可靠性,确保移动设备能够在高速移动的过程中保持稳定的通信连接。

(c) 切换时延(Handover Latency)。该指标用于衡量移动设备从检测到需要切换的信号变化到成功完成切换所经历的时间。较低的切换时延表示通信系统具有快速响应和高效的切换机制,能够在移动速度较高的情况下保持通信的稳定性和连续性。

### 3 总结

本文深入探讨了6G通信技术在极可靠和低延迟通信场景下的关键应用方向和挑战。通过对典型应用场景的分析和评估,展示了不同领域对低时延高可靠性通信的需求,包括运动控制、移动控制面板、分布式能源资源和微电网以及远程手术等,并详细描述了每个应用场景的通信服务性能要求和关键指标。在分析典型应用场景的基础上,本文提出了构建6G通信系统低时延高可靠性能指标体系的框架。该框架以网络性能指标、服务性能指标和辅助性能指标为基础,灵活适应不同场景和应用需求。通过对关键指标的详细描述和分析,提出了针对数据时延、可靠性、可

用性、连接密度、数据速率和移动速度等关键指标的量化计量方法,为6G通信系统性能评估提供了实用性的工具和方法,为6G通信系统的设计、优化和部署提供了重要参考,有助于实现更高效、更可靠的通信服务。

### 参考文献:

- [1] 中国联通研究院. 中国联通6G业务白皮书[R/OL]. [2024-01-01]. <https://book.yunzhan365.com/grhe/ukhz/mobile/index.html>.
- [2] 范济安,李建和,赵兴龙,等. 5G uRLLC技术在汽车制造业中的探索与实践[C]//2022工业互联网学术大会论文集. 北京:中国通信学会工业互联网委员会,2023:95-107.
- [3] IQBAL S B, AWADA A, KARABULUT U, et al. Analysis and performance evaluation of mobility for multi-panel user equipment in 5G networks [C]//2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE, 2022: 1-7.
- [4] ZHANG P, WU B, ZHENG Y, et al. A switching method of feeder automation control strategy based on 5G communication delay [C]//2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). Piscataway: IEEE, 2022: 2203-2208.
- [5] CHAKRABORTY S, Pillai S. AI/ML enabled decision making in facilitating robotic surgery [C]//2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA). Piscataway: IEEE, 2022: 42-46.
- [6] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains: 3GPP TS 22.104 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [7] SAATCHI N S, YANG H C, LIANG Y C. Novel adaptive transmission scheme for effective uRLLC support in 5G NR: a model-based reinforcement learning solution [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(1): 109-113.
- [8] 3GPP. Service requirements for the 5G system: 3GPP TS 22.261 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [9] ZHANG J J, JING T J, MA C. Research on data synchronization method for differential protection of distribution network based on 5G communication [C]//2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Piscataway: IEEE, 2022: 736-740.
- [10] RISCHKE J, VIELHAUS C, SOSSALLA P, et al. Empirical study of 5G downlink & uplink scheduling and its effects on latency [C]//2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Piscataway: IEEE, 2022: 11-19.

### 作者简介:

李静,高级工程师,主要从事移动通信无线技术研究等相关工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,主要从事移动通信及固移融合等专业的标准制定、课题研究工作;张涛,正高级工程师,硕士,主要从事移动通信网络无线新技术研究等工作。