

ICS 33.180.10

CCS M 33



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

多场景空间光电混合组网架构设计规 范

Multi-scenario spatial optoelectronic hybrid networking architecture design
specification

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 设计原则 2

 4.1 可靠性原则 2

 4.2 高效性原则 2

 4.3 可扩展性原则 2

 4.4 安全性原则 2

 4.5 经济性原则 2

 4.6 兼容性原则 2

5 架构总体设计 2

 5.1 架构分层 2

 5.2 功能模块 2

 5.3 架构形态 3

6 关键接口与通信机制 3

 6.1 光电互换接口 3

 6.2 链路切换时延 3

 6.3 SDN 控制信令接口 3

 6.4 自动发现与链路自愈 3

7 性能要求 4

 7.1 技术指标要求 4

 7.2 安全性要求 4

 7.3 可靠性要求 4

8 测试与验证 4

 8.1 性能测试 4

 8.2 安全性验证 4

 8.3 可靠性验证 5

9 应用场景与实施建议 5

 9.1 地面通信扩展场景 5

 9.2 空地融合场景 5

 9.3 近空间与轨道场景 5

 9.4 实施建议 5

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

多场景空间光电混合组网架构设计规范

1 范围

本文件规定了多场景空间光电混合组网系统的设计原则、架构总体设计、关键接口与通信机制、性能要求、测试与验证、应用场景与实施建议。

本文件适用于智慧城市、工业互联网、应急通信、军事通信以及其他多场景下的空间光电混合组网系统的设计与实施。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4208 外壳防护等级 (IP代码)

GB/T 18759.6 机械电气设备 开放式数控系统 第6部分：网络接口与通信协议

GB/T 38636 信息安全技术 传输层密码协议 (TLCP)

YD/T 2159 接入网用光电混合缆

IEC 61753-1 光纤互连器件和无源元件 性能标准 第1部分：总则和指南 (Fibre optic interconnecting devices and passive components - Performance standard - Part 1: General and guidance)

3 术语和定义

YD/T 2159界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光电混合组网 optoelectronic hybrid networking

在同一网络架构中，通过光信号与电信号的协同传输，实现通信数据与电能一体化传输、交换与管理的网络系统。

3.2

多场景空间 multi-scenario spatial

在不同物理环境、功能区域和应用条件下，通过统一架构和接口标准实现网络系统部署与互联的综合空间范畴。

3.3

电通信 electrical communication

利用射频信号实现信息传输的通信方式，覆盖范围广，稳定性高。

3.4

空间光通信 space optical communication

基于自由空间光 (FSO) 链路实现信息传输的通信方式，具有带宽高、抗电磁干扰强等特点。

4 设计原则

4.1 可靠性原则

网络架构应具备高可靠性，采用冗余设计、容错机制等技术手段，保障网络在设备故障、链路中断等异常情况下仍能正常运行。

4.2 高效性原则

网络架构应具备高效的数据传输能力，优化路由算法和资源分配策略，降低网络时延和丢包率。光链路应充分发挥大容量、低损耗的优势，电链路应合理规划以满足灵活接入的需求，网络整体传输效率应满足不同业务的服务质量要求。

4.3 可扩展性原则

网络架构应具备良好的可扩展性，能够适应业务量的增长和新业务的接入需求。硬件设备应支持模块化扩展，软件协议应兼容未来的技术升级，网络端口数量和带宽应具备一定的扩容空间。

4.4 安全性原则

网络架构应具备完善的安全防护机制，保障数据传输的机密性、完整性和可用性。采用加密技术、访问控制、入侵检测等安全措施，防范网络攻击和数据泄露等安全风险。

4.5 经济性原则

在满足网络性能和功能要求的前提下，合理控制网络建设和运维成本。优化设备选型和网络拓扑设计，降低设备采购、部署和维护的费用，提高网络建设性价比。

4.6 兼容性原则

网络架构应具备良好的兼容性，应能与现有网络设备、通信协议和业务系统无缝对接。应支持主流的光接口和电接口标准，兼容不同厂商的设备。

5 架构总体设计

5.1 架构分层

多场景空间光电混合组网应采用分层架构，包括接入层、汇聚层、传输层和核心层：

- a) 接入层：节点终端设备与用户终端接口，主要负责数据采集和初步处理；
- b) 汇聚层：汇聚多个接入节点的数据，提供初步的数据管理和路由转发功能；
- c) 传输层：通过光链路或电链路实现各节点之间的数据高速传输；
- d) 核心层：核心交换和控制节点，管理全网资源，提供网络调度和安全保障。

5.2 功能模块

5.2.1 光电融合终端模块

光电融合终端模块功能及要求如下：

- a) 负责光链路和电链路的数据采集、编码、调制与发送；
- b) 光链路传输速率 ≥ 40 Gbps（误码率 $\leq 10^{-9}$ ），电链路传输速率 ≥ 10 Gbps（误码率 $\leq 10^{-6}$ ）；
- c) 支持链路热插拔和自动重连，切换延迟 ≤ 50 ms

5.2.2 自适应链路管理模块

自适应链路管理模块功能及要求如下：

- a) 实时监测链路状态，支持负载均衡与多路径切换；
- b) 链路状态采样频率 ≥ 10 Hz，链路切换响应时间 ≤ 30 ms。

5.2.3 动态资源编排模块

动态资源编排模块功能及要求如下：

- a) 集中/分布式管理计算、存储和通信资源；

b) 资源利用率 $\geq 85\%$, 调度响应 ≤ 50 ms。

5.2.4 网络安全与身份认证模块

网络安全与身份认证模块功能及要求如下：

- a) 对节点及链路进行身份认证, 提供防火墙、入侵检测、防DDoS攻击等安全机制；
- b) 安全事件响应 ≤ 5 min, 数据泄露率 $\leq 0.001\%$ 。

5.2.5 数据分发与容错模块

数据分发与容错模块功能及要求如下：

- a) 对多节点、多链路的数据进行高效分发, 保证关键数据的可靠传输；
- b) 提供数据冗余、备份及容错机制, 支持系统自愈；
- c) 关键业务容错率 $\geq 99.99\%$ 。

5.3 架构形态

5.3.1 地面—空中协同组网

地面节点与低空平台协同, 光链路用于高带宽业务, 电链路备用；适用于应急或临时部署。

5.3.2 近空间—轨道混合中继

近空间平台作为中继连接地面与卫星, 实现远程和海洋通信, 链路高可用。

5.3.3 全域空间光电一体化骨干网

卫星骨干节点与地面核心节点构建光电混合骨干网, 边缘节点通过电链路接入；适用于全球或大范围覆盖, 高容量、高速、可靠通信。

6 关键接口与通信机制

6.1 光电互换接口

光电互换接口应满足以下要求：

- a) 接口应符合统一的物理层协议与编码格式, 满足GB/T 18759.6的要求；
- b) 应支持NRZ、PAM4等主流调制方式, 传输速率范围不低于1 Gbps~100 Gbps；
- c) 接口信号电平、插损及回波损耗应符合IEC 61753-1的要求；
- d) 接口应具备速率自适应与自动协商能力。

6.2 链路切换时延

光通信与电通信链路切换应满足以下要求：

- a) 切换时延不应超过50 ms, 实时业务推荐 ≤ 30 ms；
- b) 系统应具备链路热备份功能, 主备链路延迟偏差 ≤ 10 μ s；
- c) 切换过程中应保持业务连续性, 关键数据包不丢失；
- d) 应具备链路状态检测、路径重配置及缓存补偿机制。

6.3 SDN 控制信令接口

基于SDN的控制信令接口应符合以下要求：

- a) 控制接口应采用OpenFlow 1.5或等效协议规范；
- b) 应支持gRPC或RESTful API通信方式, 控制时延 ≤ 10 ms；
- c) 控制平面与数据平面应分离设计, 支持跨域资源调度；
- d) 应具备访问认证、日志审计和安全互操作能力。

6.4 自动发现与链路自愈

组网节点间的自动发现与链路自愈应满足以下要求：

- a) 节点应具备自动发现功能, 发现时间 ≤ 3 s；
- b) 应支持LLDP或轻量级自定义发现协议；
- c) 链路故障检测与重构时间不应超过100 ms；
- d) 系统应具备多跳路径恢复能力, 业务恢复成功率 $\geq 99.99\%$ ；

e) 应具备链路健康监测与状态上报功能，支持网络运维优化。

7 性能要求

7.1 技术指标要求

系统设计关键技术指标要求见表1。

表1 技术指标要求

序号	项目	技术指标
1	链路可用率	$\geq 99.9\%$
2	光链平均吞吐量	$\geq 10\text{ Gbps}$
3	光电切换时延	$\leq 50\text{ ms}$
4	误码率（BER）	$\leq 10^{-9}$
5	网络时延抖动	$\leq 5\text{ ms}$
6	控制指令响应时间	$\leq 200\text{ ms}$

7.2 安全性要求

安全性要求如下：

- a) 系统应具备物理层、链路层与端到端数据加密机制；物理层加密应采用硬件级加密芯片，链路层加密算法应符合GB/T 38636的规定；
- b) 应支持节点级双因素认证与访问控制，身份验证失败率 $\leq 0.1\%$ ；
- c) 控制接口应具备防重放、防伪造与访问日志记录功能；
- d) 系统应支持安全策略动态更新与多级权限管理；
- e) 加密数据传输的延迟增加量不应超过3%。

7.3 可靠性要求

可靠性要求如下：

- a) 网络控制系统应具备抗干扰、抗攻击与容灾备份能力；
- b) 光电切换节点应具备至少1+1冗余机制，冗余切换时间 $\leq 100\text{ ms}$ ；
- c) 节点平均无故障时间（MTBF）应 $\geq 10000\text{ h}$ ，系统平均修复时间（MTTR）应 $\leq 2\text{ h}$ ；
- d) 应建立链路健康监测机制，支持故障预警与自动重路由；
- e) 网络在单节点或单链路故障情况下，应保持 $\geq 95\%$ 的业务连续性；
- f) 电源系统应具备双电源输入或备用电池供电能力，持续供电时间 $\geq 30\text{ min}$ 。

8 测试与验证

8.1 性能测试

8.1.1 链路可用率测试

在连续运行7天的条件下记录链路中断时长，按以下公式计算可用率：

$$\text{可用率} = (1 - \text{中断时间} / \text{总运行时间}) \times 100\%$$

8.1.2 吞吐量测试

在稳定负载下测量光链实际传输速率，测试时间不少于1 h，计算平均值。

8.1.3 误码率测试

采用误码仪（BER Tester）进行PRBS31模式测试，结果应 $\leq 10^{-9}$ 。

8.1.4 切换时延测试

通过链路切断—恢复试验测量切换过程总时延。

8.1.5 时延抖动测试

利用网络分析仪测量端到端时延波动。

8.2 安全性验证

8.2.1 加密验证

采用解密测试，验证物理层、链路层及端到端加密是否生效。

8.2.2 认证验证

模拟非法接入与重复登录，验证节点是否拒绝连接并记录日志；

8.2.3 抗攻击测试

进行DDoS、数据注入等安全攻击模拟，验证系统是否保持可用，关键服务不中断。

8.2.4 安全策略更新测试

下发不同粒度（策略规则、ACL、证书撤销列表）安全策略并测量下发到生效时间。

8.3 可靠性验证

8.3.1 冗余切换测试

人为断开主链路/主节点电源，触发主备切换，重复至少10次。

8.3.2 长时运行测试

系统在典型负载下连续运行168 h（7 d），期间进行性能与状态监测。

8.3.3 MTBF/MTTR 验证

依据实际运行或加速老化试验数据统计故障间隔时间与修复时间。

8.3.4 容灾测试

模拟单点或多点故障（单节点、单链路、机房失电等），并评估系统自动重路由、数据恢复与业务降级策略。

9 应用场景与实施建议

9.1 地面通信扩展场景

在应急通信、复杂地形网络补盲中实现光电协同覆盖。

9.2 空地融合场景

在无人机集群通信与机载中继系统中实现多链冗余。

9.3 近空间与轨道场景

在星间、星地及平流层通信中构建高带宽低时延链路。

9.4 实施建议

推广阶段应优先建设光电混合中继试验区，逐步形成标准化接口体系与可复用模块库。