

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—XXXX

低轨卫星激光通信终端光学系统通用技术 要求

General technical requirements for optical systems of low-earth orbit satellite laser
communication terminals

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国西部开发促进会 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 技术要求 1

 4.1 光学性能 1

 4.2 机械性能 2

 4.3 捕获跟踪 2

 4.4 通信性能 3

 4.5 环境适应性 3

 4.6 安全要求 4

5 试验方法 4

 5.1 光学性能测试 4

 5.2 机械性能测试 10

 5.3 捕获跟踪测试 14

 5.4 通信性能测试 36

 5.5 环境适应性测试 38

 5.6 安全测试 39

6 检验规则 39

 6.1 检验分类 39

 6.2 定型检验 39

 6.3 逐批检验 39

 6.4 周期检验 40

7 标志、包装、运输和贮存 40

 7.1 标志 40

 7.2 包装 40

 7.3 运输 40

 7.4 贮存 40

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

低轨卫星激光通信终端光学系统通用技术要求

1 范围

本文件规定了低轨卫星激光通信终端的光学系统的技术要求、试验方法、检验规则的内容。
本文件适用于低轨卫星激光通信终端的光学系统的设计、生产、检验和应用。

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 191 包装储运图示标志
- GB/T 5080 可靠性试验 成功率试验方案
- GB/T 7247.1 激光产品的安全 第 1 部分：设备分类、要求
- GB/T 13739 激光光束宽度、发散角的测试方法以及横模的鉴别方法
- GB/T 11443.1 国内卫星通信地球站总技术要求 第一部分：通用要求
- GB/T 11444.4 国内卫星通信地球站发射、接收和地面通信设备技术要求 第四部分 中速数据传输设备
- GB/T 46132 空间环境 航天材料空间辐射效应试验方法
- GB/T 46189 空间环境 航天器组件空间环境效应地面模拟试验通用要求
- GB/T 42863 航天器通用试验方法
- GJB 150.1A 军用装备实验室环境试验方法 第1部分：通用要求
- GJB 150.4A 军用装备实验室环境试验方法 低温试验
- GJB 150.7A 军用装备实验室环境试验方法 第7部分：太阳辐射试验
- GJB 151B 军用设备和分系统 电磁发射和敏感度要求与测量
- GJB 899A 可靠性鉴定和验收试验
- GJB 1032A 电子产品环境应力筛选方法
- GJB 2547A 装备测试性工作通用要求
- GJB 2438B 混合集成电路通用规范
- QJ 908B 电子产品老炼试验方法
- QJ 20712 航天器机构设计与验证通用要求
- QJ 3117A 航天电子电气产品手工焊接工艺技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

低轨卫星 low-orbit satellite system
在距离地球表面200公里至1500公里之间运行的卫星。

3.2

卫星激光通信终端 satellite laser communication termina
以激光为载波，实现卫星与卫星之间、卫星和航空器之间、卫星和地面站之间通信和测量的产品。

4 技术要求

4.1 光学性能

4.1.1 收发天线精度

4.1.1.1 系统波前 $\text{rms} < \lambda / 10 @ 632.8 \text{ nm}$ 。

4.1.1.2 镜片镀膜应稳定无脱落。

4.1.1.3 收发天线发散角应优于发射发散角与接收视场角的最小值的 10%。

4.1.2 收发隔离度

发射光功率与进入接收端的自身后向散射光功率之比，定量评估发射信号通过光路泄漏、背向散射等路径对接收通道的干扰程度，为链路预算设计提供关键参数。收发隔离度通常大于 100 dB。

4.1.3 发射波长

设备发射激光器所输出的中心光波长。主要为 800 nm-1100 nm、1528 nm-1565 nm。

4.1.4 发射发散角与精度

峰值能量的 $1/e^2$ 为发散角的边界，在发散角内聚集了光束能量的 86%。发散角通常小于 $100 \mu\text{rad}$ 。

4.1.5 波长稳定性

激光器输出中心波长随时间、环境变化而保持恒定不变的能力。

4.1.6 接收视场角

接收视场角定义为接收端探测器可接收到信号的立体锥角，常用全角值表示。捕获视场角 $\geq \pm 1 \text{ mrad}$ ，通信跟踪视场角为几十微弧度到几百微弧度；单模光纤耦合接收，其接收视场角为系统的耦合视场角。

4.1.7 杂散光抑制比

杂散光抑制比 $\geq 10^5$ （针对太阳背景工作条件）/杂散光抑制比 $\geq 10E5$ （针对太阳背景工作条件）

4.2 机械性能

4.2.1 结构强度

光学系统结构应满足发射、在轨运行及机动工况下的力学环境要求，包括但不限于静力载荷、随机振动、冲击及热变形等条件。应满足运载火箭发射环境要求（随机振动、正弦振动、冲击）；关键光学组件（主镜、次镜、探测器、转台等）在载荷作用下不得发生松动、失效或永久变形；在全温区范围内，结构变形不应影响光轴稳定性及系统光学性能。

4.2.2 光学元件表面质量

光学元件及关键结构表面质量应满足激光通信系统对散射和波前误差的要求：

- a) 光学表面粗糙度： $\leq 5 \text{ nm RMS}$ （反射镜典型要求）；
- b) 面形精度： $\leq \lambda / 40 @ 632.8 \text{ nm}$ （或等效指标）；
- c) 表面缺陷等级：应满足 MIL-PRF-13830B 或等效标准。

4.3 捕获跟踪

4.3.1 捕获概率

在规定链路条件及指向误差范围内，系统应具备高可靠捕获能力：捕获概率 $\geq 95\%$ ，在典型轨道误差与姿态误差条件下满足上述指标。

4.3.2 捕获时间

在轨道、姿态综合不确定区域 $\pm 1 \text{ mrad}$ 工况下，初始捕获 $\leq 15 \text{ s}$ 、重捕获 $\leq 10 \text{ s}$ 。

4.3.3 扫描方式

4.3.3.1 系统应支持多种扫描策略，并可根据任务进行配置。

4.3.3.2 支持以下扫描方式：方螺旋扫描、矩形行扫、圆螺旋扫描；并且扫描参数（扫描步长、单步停留时间、扫描不确定区域半径）应可配置，扫描过程中应保证视场覆盖连续、无盲区。

4.3.4 捕获视场范围

捕获视场： $\geq \pm 1 \text{ mrad}$ （典型值），视场范围应覆盖轨道预报误差及姿态误差叠加范围。

4.3.5 无、有信标光

系统应支持以下两种工作模式：

- a) 有信标光捕获模式：能够对对方信标光进行快速识别与锁定；
- b) 无信标光捕获模式：依赖轨道预报及扫描策略完成捕获，捕获概率应满足任务要求。

4.3.6 跟踪精度

精跟踪误差（在精跟踪范围内，且扰动幅值小于精跟踪范围和频率低于规定的精跟踪带宽）： $\leq 5 \mu\text{rad}$ （ 3σ ）。

4.3.7 跟踪视场

精跟踪视场： $\geq \pm 100 \mu\text{rad}$ ，应覆盖平台抖动及指向误差残差。

4.3.8 跟踪带宽

跟踪控制带宽： $\geq 100 \text{ Hz}$ （典型值），应能够抑制平台振动及扰动。

4.3.9 跟踪灵敏度

最低可跟踪光功率： $\leq -45 \text{ dBm}$ （典型值，可按链路预算调整），在低信噪比条件下仍可保持稳定跟踪。

4.3.10 指向精度

指向精度误差控制在 $15''$ 以内。

4.3.11 自标校

4.3.11.1 系统应具备在轨自标校能力，包括但不限于：光轴与平台坐标系对准误差标定，跟踪器与发射光轴偏差标定，温漂补偿。

4.3.11.2 标校精度： $\leq 2''$ 。

4.4 通信性能

4.4.1 入瞳通信接收灵敏度

在规定的通信速率下，为达到指定的误码率要求，所需要的入射到激光通信载荷接收天线口径的最低接收信号光功率。

4.4.2 通信调制体制

卫星激光载荷通过改变发射激光光载波的幅度、相位、频率和偏振，将基带数字/模拟信号搬移到光载波上传输的标准映射规则。

4.4.3 误码率

在卫星激光载荷双端通信过程中，传输信息过程中发生错误的比特数占总传输比特数的比值。

4.4.4 编码方式

定义为在卫星激光载荷双端通信过程中，传输信息过程中在发送端原始信息比特中按一定规则增加校验信息，接收端校验信息检测并纠正传输过程中的错误信息。

4.4.5 发射光功率

卫星激光载荷激光器发射激光功率设置为最大值时，在光学系统出瞳处的光功率。

4.5 环境适应性

4.5.1 温度和湿度

卫星激光载荷调试、测试所处的环境。

4.5.2 热循环

卫星激光载荷整机在一定温变条件下反复进行高低温切换，通过温度交变应力筛选工艺缺陷的可靠性试验。

4.5.3 老炼

卫星激光载荷整机在真空长期加电情况下进行可靠性加速筛选。

4.5.4 空间辐射适应性

卫星激光载荷整机在真空下受到空间粒子的照射后对功能性能的影响。

4.5.5 热真空适应性

卫星激光载荷整机在真空条件下，对卫星施加在轨真实温度剖面，并全程加电运行，模拟太空热真空真实环境。

4.5.6 力学环境适应性

4.5.6.1 系统应能承受卫星发射过程中的振动、冲击等力学环境，在振动试验（振动频率范围、加速度幅值等按具体产品规范执行）和冲击试验（冲击加速度、脉冲宽度等按具体产品规范执行）后，设备性能应无明显下降。

4.5.6.2 对于部组件级的电路板、前光机、后光路、单机等组件应开展力热环境应力筛选试验，以剔除早期应力，保证整机力学环境适应性。

4.5.6.3 对于元器件及电路板等器件应开展二次老化筛选、温度冲击、三防喷涂、质保等过程控制措施。

4.6 安全要求

4.6.1 电气安全

卫星激光载荷整机在地面测试、发射阶段，入轨后全生命周期具备不发生电气事故的电气综合防护和可靠性运行能力。

4.6.2 激光安全

符合GB/T 7247.1的激光辐射等级要求。

4.6.3 寿命

卫星激光载荷在规定的空间环境、任务剖面、维护策略下，从入轨开始到性能退化至不满足任务指标为止的总在轨使用时间。

4.6.4 平均无故障时间

在规定的条件，工作模式，任务剖面下，卫星载荷处于稳定工作期时，相邻两次故障之间平均的工作时间。

5 试验方法

5.1 光学性能测试

5.1.1 收发天线精度

5.1.1.1 测试配置

测试连接框图如图1所示。

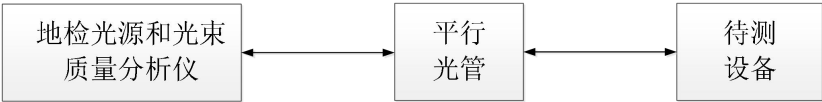


图 1 收发天线精度测试配置

5.1.1.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 1 所示连接所有测试设备；
- b) 将待测设备稳固安装在测试工装上；
- c) 调整待测设备与平行光管的相对位置，确保平行光管光轴与待测设备光轴重合；
- d) 静态指向精度测试：测量并记录实际光轴与目标理论位置的残余误差；
- e) 动态跟踪精度测试：分析脱靶量，计算跟踪误差；
- f) 收发同轴度测试：测量发射光轴与接收光轴的角度偏差。

5.1.1.3 注意事项

确保平行光管的波前特性与实际远场一致，避免“近场效应”引入测试误差。

5.1.2 收发隔离度

5.1.2.1 测试配置

测试连接框图如图2所示。



图 2 收发隔离度测试配置

5.1.2.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 2 所示连接所有测试设备；
- b) 启动待测设备，将其激光器的发射功率设定至额定工作标准，待激光器输出功率稳定后，记录此时的发射功率 P_{SL} ；
- c) 光功率计设置在被测光波长上，从光功率计读出此时待测设备接收通道的功率 P_{RL} ；
- d) 收发隔离度可通过公式（1）进行计算：

$$L = P_{SL} - P_{RL} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- L ——收发隔离度，单位为分贝（dB）；
- P_{SL} ——激光器的输出功率，单位为分贝-毫瓦（dBm）；
- P_{RL} ——待测设备接收通道的功率，单位为分贝-毫瓦（dBm）。

5.1.2.3 注意事项

待测终端发射光轴应指向开放空间，避免因障碍物散射产生二次回波干扰。

5.1.3 发射波长

5.1.3.1 测试配置

设备通信光波长测试框图如图3所示。

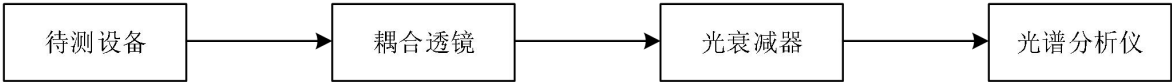


图 3 发射波长测试配置

5.1.3.2 操作步骤

- 操作步骤如下：
- a) 参照图 3 连接测试系统；
 - b) 开启光谱分析仪，预热至工作稳定状态；将可调光衰减器调至最大衰减量档位；
 - c) 开启待测设备，输出发射光束，调节耦合透镜，将发射光高效耦合至光纤中；
 - d) 连接光纤至光谱分析仪，根据仪器动态范围调整光衰减器的衰减值，确保输入光强适中；
 - e) 读取并记录光谱分析仪显示光谱的峰值中心波长，该值即为发射波长。

5.1.4 发射光功率

5.1.4.1 测试配置

发射光功率测试框图如图4所示。

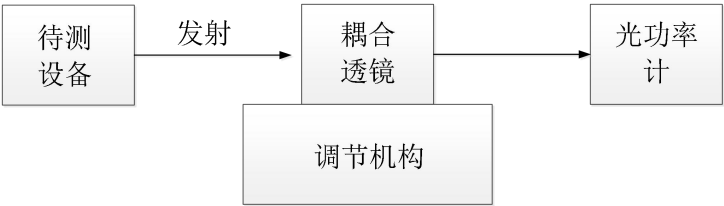


图 4 发射光功率测试配置

5.1.4.2 操作步骤

- 操作步骤如下：
- a) 耦合透镜标定：在独立测试中预先标定所用耦合透镜的光传输损耗系数，该值将作为校准数据，但不计入最终产品性能指标；
 - b) 参照图 4 连接系统，调节耦合透镜的位置与姿态，确保待测设备发射光轴与耦合透镜的光轴平行；
 - c) 启动待测设备，将其激光器的发射功率设定至额定工作标准，待激光器输出功率稳定后，发射光经耦合透镜会聚后，落在光功率计探头的感光面中心；
 - d) 根据发射激光的波长选择合适的光功率计波长，记录光功率计显示的稳定读数（单位可为 mW 或 dBm）。

5.1.4.3 注意事项

- 注意事项如下：
- a) 所用耦合透镜的有效通光口径应大于待测设备发射光束直径；
 - b) 发射光束经耦合透镜过程会引入额外的损耗，需进行补偿。

5.1.5 发射发散角与精度

5.1.5.1 测试配置

发射发散角测试框图如图5所示。



图 5 发射发散角测试配置

5.1.5.2 操作步骤

- 操作步骤如下：
- a) 依据图 5 连接搭建测试光路；
 - b) 将待测设备放置真空环境中，并置于平行光管前方；

- c) 精确调节，使待测设备与平行光管实现光轴对准；
 d) 利用平行光管和光束质量分析仪测试待测设备发射发散角的发散角 θ_x 和 θ_y 按公式（2）和公式（3）计算：

$$\theta_x = \frac{d_x}{f} \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta_y = \frac{d_y}{f} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

θ_x 、 θ_y ——X、Y方向发散角，单位为毫弧度(mrad)；

d_x 、 d_y ——平行光管焦面 $1/e^2$ 光斑横向、纵向宽度，单位为毫米(mm)；

f ——有效焦距，单位为毫米(mm)。

5.1.5.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 测试中使用的平行光管和光束质量分析仪需经过校准，且其分辨率与稳定性应高于待测设备的指标要求一个数量级；
 b) 待测设备在真空环境下经过真空罐光窗可能引入额外的偏移，需进行评估或补偿。

5.1.6 波长稳定性

5.1.6.1 测试配置

波长稳定性测试可参考“5.1.3发射波长”的测试框图（图2）进行，但需确保测试系统（尤其是光谱分析仪）在测试周期内自身的稳定性满足更高要求。对于需要施加环境应力的测试，应将待测终端置于高低温试验箱或振动台等环境试验设备中，并通过光纤将光信号引出至外部的光谱分析仪进行测量。

5.1.6.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 基准测量：在标准实验室环境（如室温 25℃）下，按照“5.1.3 发射波长”的步骤，测量并记录发射激光的初始中心波长；
 b) 稳定性监测（长期/工作寿命）：使终端在额定工作条件下连续运行规定的时间（如 24 小时、100 小时）；在运行期间，按预设的时间间隔（如每隔 1 小时）重复步骤 a)，测量并记录中心波长 λ_i ；
 c) 环境应力测试（可选）：将终端放入高低温试验箱，按照产品规范进行温度循环，在高温和低温的稳定保持阶段，分别测量发射波长；
 d) 振动试验后（可选）：在终端完成规定的振动试验后，立即在标准实验室环境下复测其发射波长。

5.1.6.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 测试中使用的光谱分析仪需经过校准，且其分辨率与稳定性应高于被测系统的指标要求一个数量级；
 b) 用于传导光信号的光纤在高低温环境下可能引入额外的波长偏移或损耗，需进行评估或补偿；
 c) 测试报告应详细记录测试条件（温度、湿度、终端工作状态）、测量时间点及对应的波长值。

5.1.7 接收视场角

5.1.7.1 测试配置

捕获视场测试框图如图6所示。



图 6 接收视场角测试配置

5.1.7.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 6 连接测试系统；
- b) 将待测设备的接收光轴精确对准平行光管接收光轴；
- c) 启动地检光源，使其发射待测设备接收波长光束；
- d) 将此准直信号光精确引导至待测终端的接收光路视场中心；
- e) 缓慢精确旋转二维转台，将接收光移动到接收光路有效边界处，反向缓慢精确旋转二维转台，将接收光移动到接收光路与视场中心对称的另一有效边界处，记录此时二维转台转动的角度，即为待测设备该接收光路的接收视场角。

5.1.7.3 注意事项

测试中使用的二维转台的角度分辨率与稳定性应高于待测设备的接收视场角一个数量级。

5.1.8 杂散光抑制比

5.1.8.1 测试配置

杂散光抑制比试验用于验证星载激光通信终端在存在背景光干扰条件下对目标信号光的抑制杂散光能力，以及在规定背景辐照条件下保持目标检测、捕获或跟踪能力的性能水平。试验通过在黑室环境中引入受控背景光，测量终端在有无背景光条件下的响应变化，从而评估终端杂散光抑制能力。测试设备包括：

- a) 地检光源（波长、功率可调）：用于模拟对端激光通信终端发出的目标信号光，其输出波长应与被测终端接收波段一致，输出功率应可调，并能满足捕获或跟踪测试所需的动态范围。在本试验中，地检光源主要用于提供稳定的基准目标信号，以便比较终端在无背景光条件和有背景光条件下的性能变化。地检光源应具备以下能力：
 - 1) 输出波长可调，并与终端接收波段匹配；
 - 2) 输出功率可调，以满足不同测试工况要求；
 - 3) 输出稳定连续光束，功率波动应控制在允许范围内。
- b) 平行光管：用于将地检光源输出光束准直，形成远场目标来光，模拟实际链路中的目标信号入射条件。平行光管应满足以下要求：
 - 1) 输出准直光束稳定，方向明确；
 - 2) 光束波前质量满足终端检测、捕获或跟踪测试要求；
 - 3) 与被测终端之间光轴关系清晰、可校准；
 - 4) 能保证目标光在黑室内稳定进入终端接收光路。
- c) 背景光模拟器：用于模拟终端工作环境中可能出现的背景辐射和杂散光干扰，如太阳入射光、地球反射光、舱内反射杂散光等。背景光模拟器应具备以下能力：
 - 1) 输出光强可调；
 - 2) 背景光照射方向可调；
 - 3) 背景光照射范围可调；
 - 4) 可形成稳定连续背景照射条件；
 - 5) 可实现多方向背景光入射。
- d) 根据试验需求，背景光设备可用于模拟：
 - 1) 目标视场附近的背景光干扰；
 - 2) 光机结构内部的散射诱发工况；
 - 3) 接收通道中的强背景照射工况。
- e) 光学黑室：用于提供受控暗环境，抑制外部环境光对试验结果的影响，并保证背景光设备形成的干扰条件具有可控性和可重复性。黑室应满足以下要求：
 - 1) 内壁应具备良好的消光能力；
 - 2) 外界杂散光泄漏应控制在允许范围内；

- 3) 能容纳地检光源、平行光管、背景光设备和被测终端的布置;
- 4) 能保证试验过程中的背景光条件稳定。
- f) 星载激光通信终端: 为被测对象, 内部包含光学接收系统、探测器、二维转台、捕获跟踪组件及控制处理单元等。终端应能够在主控上位机控制下完成目标检测、捕获或跟踪, 并输出相关状态量和遥测参数。在本试验中, 终端主要用于验证在背景光干扰条件下的目标保持能力及响应变化, 输出内容通常包括: 捕获状态或跟踪状态、跟踪误差或探测响应、关键遥测参数、失锁或异常状态信息。
- g) 主控上位机: 用于完成试验控制、状态监视、遥测采集、数据记录和结果统计。其主要功能包括:
 - 1) 控制终端进入规定工作模式;
 - 2) 记录地检光源和背景光设备的设置参数;
 - 3) 采集终端在无背景光和有背景光条件下的状态与遥测;
 - 4) 记录终端性能变化及失效边界;
 - 5) 统计杂散光干扰前后的性能指标变化;
 - 6) 保存原始试验数据和试验结果。
- h) 测试连接关系: 试验时, 地检光源输出目标信号光, 经平行光管形成远场目标来光后进入星载激光通信终端; 背景光设备在黑室内向终端施加受控背景光干扰; 主控上位机与终端建立遥控遥测通信链路, 对试验过程进行控制和记录。测试配置关系见图 18:

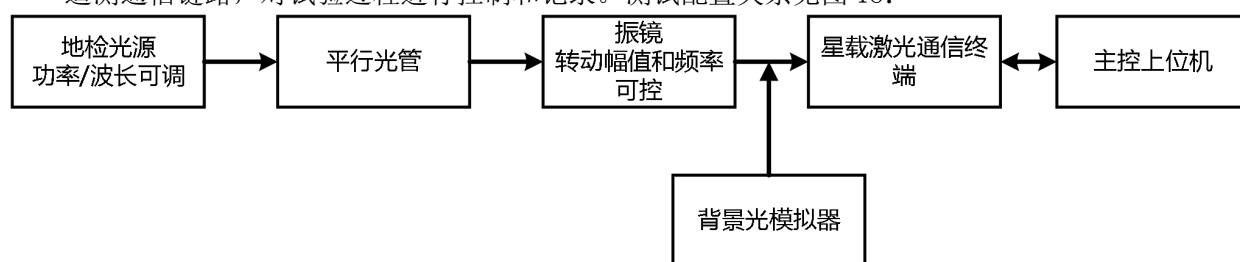


图 7 杂散光抑制比测试框图

5.1.8.2 操作步骤

操作步骤如下:

- a) 试验准备: 在黑室内完成地检光源、平行光管、背景光设备、星载激光通信终端和主控上位机的安装与连接。检查各设备供电、通信及软件状态, 确认系统工作正常。设置地检光源输出波长和初始功率, 使其满足终端正常检测、捕获或跟踪要求。调整平行光管光轴, 确保目标光准确进入被测终端接收口径。调整背景光设备位置和照射方向, 使其能够形成规定的背景光干扰条件。启动星载激光通信终端并完成自检。启动主控上位机, 建立与终端的遥控遥测通信链路, 明确无背景光基准工况、有背景光工况及杂散光抑制比计算方法。
- b) 无背景光基准测试: 关闭背景光设备, 仅保留地检光源输出目标信号光。使终端进入规定工作模式(可为检测模式、捕获模式或跟踪模式)。记录终端在无背景光条件下的输出响应或性能指标, 作为基准数据。主控上位机记录以下信息: 地检光源波长与功率; 终端工作模式; 终端输出响应、跟踪误差、探测状态或捕获状态; 关键遥测参数。
- c) 有背景光条件测试: 保持地检光源输出目标信号光不变。开启背景光设备, 并设置背景光强度、照射方向和照射范围。在规定背景光条件下, 使终端保持检测、捕获或跟踪工作。主控上位机记录以下信息: 背景光强度; 背景光照射方向与位置; 终端输出响应变化; 终端捕获或跟踪状态变化; 关键遥测参数变化; 是否出现误捕获、失锁、误差增大或探测性能下降。
- d) 背景光强度逐级增加测试: 在保持目标信号光条件不变的情况下, 按预定步进逐级增加背景光强度。每增加一级背景光后, 保持一定观察时间, 记录终端工作状态。观察终端在不同背景光条件下的目标检测、捕获或跟踪能力变化。当终端性能下降至规定阈值, 或出现误判、失锁、无法保持正常工作时, 记录对应背景光工况。
- e) 杂散光抑制比计算: 根据试验设计, 可采用以下方式之一进行评估:
 - 1) 响应比法: 比较终端在无背景光和有背景光条件下的目标响应变化;

- 2) 临界背景光法：记录终端仍可正常工作的最大背景光干扰水平；
- 3) 信杂比法：根据信号响应与背景响应计算杂散光抑制比；
- 4) 当采用信杂比表示时，杂散光抑制比可表示为公式（4）：

$$K = \frac{S}{B} \dots \dots \dots (4)$$

式中：

K ——为杂散光抑制比；

S ——为目标信号有效响应；

B ——为背景光引起的杂散响应。

- f) 重复试验与结果统计：在相同测试条件下重复进行多次试验，验证结果稳定性和重复性。对不同背景光方向、不同背景光强度、不同目标信号功率等工况应分别开展试验并分别统计。整理并输出杂散光抑制比或等效抗背景光能力结果。

5.1.8.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 黑室环境应满足暗场要求：试验必须在黑室条件下进行，确保外部环境光不会叠加到背景光设备形成的干扰工况中。黑室内壁应具有良好消光能力，避免二次反射对测试结果造成影响。
- b) 目标信号光与背景光应分别可控：地检光源和背景光设备应能够独立控制，避免目标光和背景光相互耦合导致参数不可区分。试验中应明确记录目标光和背景光的各自参数。
- c) 光轴关系应稳定：地检光源经平行光管形成的目标光束应稳定进入被测终端接收光路。背景光设备的照射方向、位置和范围应在各次试验中保持一致，避免因几何关系变化引起结果波动。
- d) 背景光强度变化应有标定依据：背景光设备的输出强度应经过标定，确保不同试验点之间背景光强度具有可比性。未经标定的背景光强度不得直接用于定量计算杂散光抑制比。
- e) 终端工作模式应明确：终端是在检测模式、捕获模式还是跟踪模式下进行。不同模式下的结果不得混合统计。
- f) 环境稳定性应保证：试验过程中应避免机械振动、气流扰动及温度剧烈变化影响终端性能。必要时应对黑室内部环境进行稳定控制。

5.1.8.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 单次试验有效性判定：当以下条件同时满足时，该次杂散光抑制比试验结果有效：
 - 1) 地检光源、平行光管、背景光设备、黑室、星载激光通信终端和主控上位机工作正常；
 - 2) 目标光和背景光参数满足设定要求；
 - 3) 终端工作模式明确且稳定；
 - 4) 试验过程中无通信中断、设备异常复位和严重遥测丢失；
 - 5) 性能变化结果可明确识别；
 - 6) 若任一条件不满足，则该次试验结果无效，不纳入正式统计。
- b) 基准状态判定：在无背景光条件下，终端应能够正常完成规定工作模式下的目标检测、捕获或跟踪。若在基准工况下终端已无法正常工作，则不得继续进行背景光干扰试验；
- c) 抗背景光能力判定：在施加背景光干扰后，若终端仍能够满足规定的工作性能要求，则判定该背景光工况下终端具备相应抗背景光能力。若出现误捕获、失锁、跟踪误差持续超限或探测响应显著下降，则判定该工况超出终端允许背景光范围；
- d) 杂散光抑制比判定：当采用杂散光抑制比作为考核指标时，应按试验细则规定的方法计算，并与技术要求进行比较。当计算结果满足技术指标要求时，判定试验合格；否则判定不合格。

5.2 机械性能测试

5.2.1 结构强度

5.2.1.1 测试配置

5.2.1.1.1 结构强度试验用于验证星载激光通信终端光学系统在规定机械载荷条件下的结构强度及结

构稳定性，考核系统在静载或模拟发射载荷条件下是否发生结构损伤、永久变形或光学性能下降。

5.2.1.1.2 测试设备包括：加载装置（静载加载装置或力加载机构）、位移测量装置、星载激光通信终端光学系统、主控上位机。

5.2.1.1.3 加载装置：用于对星载激光通信终端光学系统施加规定的机械载荷。加载方式可根据结构特点采用：静力加载、重力加载、砝码加载、力加载装置加载。加载装置应具备以下能力：

- a) 加载力可调、加载方向可控、加载位置可调、加载稳定、可保持恒定载荷；
- b) 加载方向一般包括：光轴方向、横向方向、垂直方向。

5.2.1.1.4 位移测量装置：用于测量结构在加载过程中的变形量及加载后的残余变形量。位移测量装置可采用：位移传感器、千分表、激光位移计、电感式位移计。

- a) 位移测量装置应具备：足够测量精度、稳定安装方式、可重复测量能力。
- b) 位移测量点应布置在：光学主结构、光学组件安装位置、转台安装界面、关键承力结构。

5.2.1.1.5 星载激光通信终端光学系统：为被测对象，包括：光机结构、光学组件、支撑结构、安装接口。试验时光学系统应按实际安装状态固定在试验工装上，安装方式应与实际使用状态一致。

5.2.1.1.6 主控上位机：采集位移测量数据、记录加载力、记录加载时间和记录卸载后残余变形、存储试验数据。

5.2.1.1.7 测试连接关系：结构强度测试框图如下图所示：

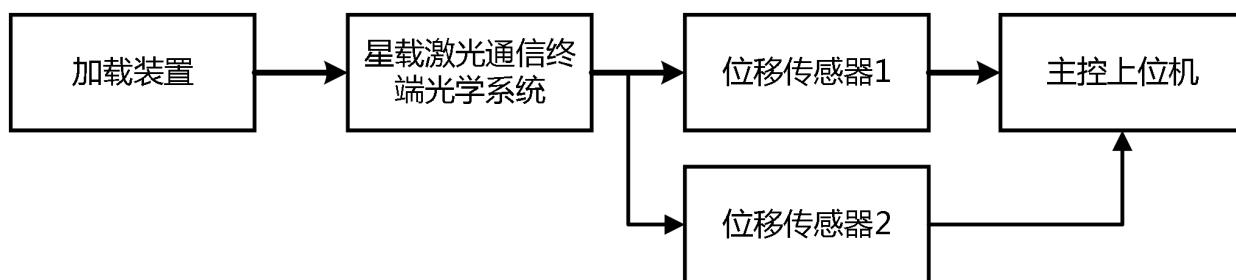


图8 结构强度测试框图

5.2.1.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：将星载激光通信终端光学系统安装在试验工装上，确认安装方式与实际使用状态一致，安装位移测量装置并确定位移测量基准点，记录初始位移值，检查加载装置工作状态，启动数据采集系统。
- b) 施加载荷：按规定方向施加静载荷，逐步增加加载力，每级加载保持稳定，记录位移变化量直至达到规定载荷值。其中加载方向包括：光轴方向、横向方向和垂直方向。
- c) 保持载荷：在最大载荷下保持规定时间，并持续记录位移变化，观察结构稳定情况，需要检查是否出现异常。
- d) 卸载：缓慢减小加载力直至完全卸载，并记录卸载后位移和计算残余变形。
- e) 外观检查：试验后需要检查光学结构、连接部位、光学组件和安装界面，确定无裂纹、无松动和无损伤。
- f) 重复测试：按不同方向（方位方向、俯仰方向和光轴方向）重复进行。

5.2.1.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 加载方向应准确：加载方向应与设计载荷方向一致，避免附加载荷；
- b) 加载应缓慢：避免冲击载荷；
- c) 位移测量基准应稳定：测量支架不得随结构移动；
- d) 加载点应合理：避免局部变形；
- e) 载荷保持时间应满足要求：保证结构稳定；
- f) 测量点应覆盖关键结构：光机结构、支撑结构和光学组件；
- g) 卸载应缓慢：避免结构反弹影响测量；

h) 环境应稳定：避免温度变化影响测量精度。

5.2.1.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 强度判定：在规定载荷下，结构不得出现裂纹、断裂、松动和损伤，否则判定不合格。
- b) 变形判定：在最大载荷下，结构变形应小于允许值。
- c) 残余变形判定：卸载后残余变形应满足残余变形小于等于允许值，否则判定不合格。
- d) 功能判定：加载后光学系统应工作正常，无卡滞、无异常和结构稳定。
- e) 外观判定：结构外观应满足，无裂纹，无损伤，无松动。
- f) 最终判定：满足以下条件判定试验合格：
 - 1) 结构无损伤；
 - 2) 变形满足要求；
 - 3) 残余变形满足要求；
 - 4) 功能正常。

5.2.2 光学元件表面质量

5.2.2.1 测试配置

测试配置如下。

- a) 表面质量试验用于验证星载激光通信终端光学系统关键光学元件的表面光洁度、表面粗糙度及面形精度是否满足设计要求，保证系统光束质量、能量传输效率及杂散光抑制能力；
- b) 测试设备包括：光学干涉仪（面形检测）、三维轮廓仪、表面粗糙度测量仪、光学显微检测系统（光洁度检测）和星载激光通信终端光学组件、主控上位机；
- c) 光学干涉仪（面形检测）：
 - 1) 光学干涉仪用于检测光学元件面形精度，测量指标包括：PV 值、RMS 值、面形误差分布和波前误差；
 - 2) 干涉仪应满足：测量精度优于被测面形要求、适配被测口径并且波长稳定。适用于：主镜、反射镜窗口片和准直透镜。
- d) 表面粗糙度测量仪：
 - 1) 表面粗糙度测量仪用于测量光学表面微观粗糙度，典型测量指标：Ra（平均粗糙度）、Rq（均方根粗糙度）；
 - 2) 设备可采用：白光干涉粗糙度仪、原子力显微镜或者光学轮廓仪；
 - 3) 粗糙度测量用于评估：散射损耗、杂散光和光束质量影响。
- e) 光学显微检测系统（光洁度）：
 - 1) 光学显微检测系统用于检测表面光洁度，包括：划痕、麻点和污染、缺陷；
 - 2) 检测标准通常依据：Scratch/Dig 标准或项目光洁度指标，检测倍率：10×~200×。
- f) 星载激光通信终端光学组件：被测对象包括：主镜、次镜、反射镜、透镜、窗口片和分光镜，每个光学元件应单独检测或整机检测；
- g) 主控上位机：用于记录面形数据、记录粗糙度数据、记录光洁度图像和保存检测报告。
- h) 测试连接关系：表面质量测试框图如下所示：

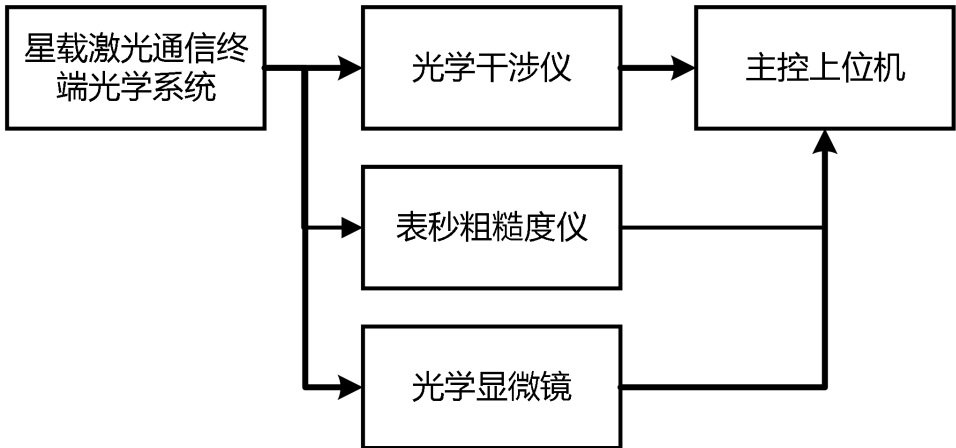


图 9 表面质量测试框图

5.2.2.2 操作步骤

操作步骤如下。

- a) 面形精度测试：
 - 1) 将被测光学元件安装至干涉仪；
 - 2) 调整干涉仪光路；
 - 3) 采集干涉条纹图像；
 - 4) 计算面形误差，记录：PV 值、RMS 值和面形分布；
 - 5) 保存测量数据。
- b) 表面粗糙度测试：
 - 1) 将光学元件放置在粗糙度测量仪上；
 - 2) 选择测量区域；
 - 3) 进行表面扫描；
 - 4) 计算粗糙度参数，记录：Ra，Rq；
 - 5) 保存测试结果。
- c) 光洁度检测：
 - 1) 使用显微系统观察光学表面；
 - 2) 按网格扫描光学口径；
 - 3) 识别划痕；
 - 4) 识别麻点；
 - 5) 记录缺陷尺寸。
- d) 全口径检测：检测区域包括：中心区域、边缘区域和有效口径范围；
- e) 数据记录：面形数据、粗糙度数据、光洁度数据并生成检测报告。

5.2.2.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 测量环境要求：测量应在洁净环境中进行，避免污染；
- b) 温度稳定：温度变化会影响面形；
- c) 光学元件固定稳定：避免测量误差；
- d) 测量位置应覆盖有效口径：避免遗漏；
- e) 粗糙度测量区域应多点：保证代表性；
- f) 面形测量应消除装调误差：避免夹持变形；
- g) 表面不应接触：避免损伤。

5.2.2.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 面形精度判定：面形误差应满足： $PV \leq$ 指标要求， $RMS \leq$ 指标要求；
- b) 粗糙度判定：表面粗糙度应满足： $Ra \leq$ 指标要求，或者 $Rq \leq$ 指标要求；
- c) 光洁度判定：光洁度应满足： $Scratch \leq$ 指标， $Dig \leq$ 指标；
- d) 当以下条件全部满足时判定合格：面形满足要求、粗糙度满足要求、光洁度满足要求。

5.3 捕获跟踪测试

5.3.1 测试配置

捕获概率试验采用地面模拟远场来光方式进行，测试设备由地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机构成。各设备组成及功能如下。

- a) 地检光源（波长、功率可调）：
 - 1) 地检光源用于模拟对端激光通信终端发出的信标光或捕获用信号光，其输出波长、功率应可调，能够覆盖被测星载激光通信终端规定的接收波段及动态功率范围；
 - 2) 地检光源应具备稳定连续输出能力，在单次试验过程中其功率波动和波长漂移应控制在允许范围内，以保证测试条件的一致性。必要时可通过上位机或本地控制方式设置输出功率等级、工作波长及开关状态。
- b) 平行光管：
 - 1) 平行光管用于将地检光源发出的光束进行准直，形成近似远场平行入射光，以模拟真实链路条件下远距离目标来光。
 - 2) 平行光管的有效口径、焦距和准直精度应满足被测终端捕获视场和接收口径要求，保证进入星载激光通信终端的光束具有良好的波前质量和方向稳定性。
 - 3) 平行光管应与地检光源进行严格的光轴对准，确保输出光束中心与被测终端标称视轴具有明确、可校准的几何关系。
- c) 星载激光通信终端：
 - 1) 星载激光通信终端为被测对象，应处于完整工作状态。终端内部包含二维转台、捕获跟踪组件、探测与控制单元等，可在主控上位机控制下完成捕获流程启动、捕获状态输出、遥测参数上传及模式切换等功能。
 - 2) 试验中终端应安装在稳定支撑平台上，安装状态与实际工作姿态要求一致，具备正常供电、正常通信和完整遥测输出条件。
- d) 主控上位机：
 - 1) 主控上位机用于完成整个捕获概率试验过程的指令发送、模式切换、遥测采集、状态监视、数据记录和结果统计。
 - 2) 主控上位机应具备如下功能：
 - (1) 能够控制星载激光通信终端进入规定测试模式；
 - (2) 能够设置或读取终端工作参数；
 - (3) 能够实时显示捕获状态、转台状态、探测器状态及相关遥测量；
 - (4) 能够记录每次试验的时间、工况参数、捕获结果及异常信息；
 - (5) 能够对多次试验结果进行统计，计算捕获成功次数和捕获概率。
- e) 测试连接关系：
 - 1) 试验时，地检光源输出的模拟信号光经平行光管准直后射入星载激光通信终端接收光路；主控上位机与星载激光通信终端建立遥控遥测通信链路，对终端进行参数设置、状态监控和试验数据记录。
 - 2) 测试配置框图如下图所示：

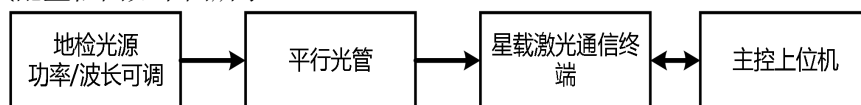


图 10 捕获概率测试框图

5.3.2 操作步骤

5.3.2.1 操作步骤如下。

- a) 试验准备:
- 1) 按测试配置完成设备安装与连接, 检查地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机工作状态是否正常。
 - 2) 完成主控上位机与星载激光通信终端之间的通信联调, 确认遥控指令可正常下发, 遥测参数可正常接收和记录。
 - 3) 设置地检光源输出波长, 使其与被测终端规定的接收波段一致; 根据测试要求设置初始输出功率。
 - 4) 对地检光源和平行光管进行光轴调整, 使平行光管输出的准直光束准确进入被测终端接收光学口径。
 - 5) 对星载激光通信终端进行上电自检, 确认二维转台、捕获探测组件、控制单元及相关功能工作正常。
 - 6) 通过主控上位机将星载激光通信终端设置为捕获测试模式, 并清零或初始化相关记录数据。
- b) 基准对准:
- 1) 在较高光功率、较优对准条件下进行初始联调, 确认被测终端能够正确接收到来自平行光管的准直来光。
 - 2) 通过上位机观察终端遥测参数, 确认捕获探测通道输出正常, 系统能正确识别目标存在状态。
 - 3) 记录基准工况下的光源功率、波长、终端工作模式和关键遥测参数, 作为后续重复试验的参考初始条件。
- c) 单次捕获试验实施:
- 1) 将星载激光通信终端置于规定的初始未捕获状态, 在可控上位机控制下启动终端捕获流程, 然后地检光源按设定工况输出信号光, 经平行光管形成准直光束照射被测终端。终端执行内部捕获逻辑, 对目标光进行检测、判识并建立捕获状态。
 - 2) 主控上位机实时采集并记录以下信息: 试验开始时间、地检光源波长和功率设置值、终端捕获状态变化和试验结束时间;
 - 3) 当终端满足预先定义的捕获成功判据时, 记为一次捕获成功; 否则记为一次捕获失败。完成单次试验后, 将终端恢复至初始未捕获状态, 准备进入下一次试验。
- d) 重复试验: 按照相同测试条件重复进行多次捕获试验。每次试验前应确认地检光源输出参数、平行光管对准状态和终端初始状态一致。重复试验次数应不少于规定值, 通常不少于 100 次; 如规范另有要求, 应按规范执行。对于不同功率等级、不同波长条件或不同工作模式, 可分别开展分组试验, 并分别统计捕获概率。
- e) 数据统计与结果计算: 捕获概率 P 计算方法如下式所示:

$$P = \frac{n}{N} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

n ——为成功捕获的次数;

N ——为进行捕获实验的总数。

5.3.2.2 对试验中出现的异常情况应单独标记, 并结合原始记录进行原因分析; 确属设备故障、通信异常或外部干扰导致的数据, 可按试验规定决定是否剔除, 但应在试验报告中说明原因和处理依据。

5.3.3 注意事项

注意事项如下。

- a) 光学条件一致性:
- 1) 地检光源输出的波长和功率应在整个试验过程中保持稳定, 避免因光源漂移引起捕获概率统计结果失真。
 - 2) 平行光管输出的准直光束应稳定、均匀, 试验过程中不得发生明显光轴偏移或离焦现象。
- b) 远场模拟有效性:

- 1) 应确保地检光源输出经过平行光管后形成满足要求的准直来光，严禁以近距离直接照射方式替代平行光管远场模拟进行正式性能考核。
- 2) 在试验前应对平行光管输出光束质量和光轴方向进行校核，确认其能够真实反映远距离目标来光条件。
- c) 初始状态一致性：
 - 1) 每次单次捕获试验开始前，星载激光通信终端均应处于一致的初始状态，包括工作模式、转台状态、捕获状态、参数设置和遥测清零状态等。
 - 2) 若初始状态不一致，将直接影响统计结果的有效性。
- d) 终端工作状态监控：
 - 1) 试验中应持续监视终端供电状态、通信状态、捕获组件状态及关键遥测量。
 - 2) 若出现终端异常复位、通信中断、转台异常、探测器异常等情况，应暂停试验，排除故障后重新开始，并对异常数据做单独标识。
- e) 环境干扰控制：
 - 1) 测试环境应避免强杂散光、振动、气流和温度剧烈变化对试验结果造成影响。
 - 2) 如在实验室条件下开展试验，宜采用遮光措施，降低环境背景光干扰。
- f) 数据记录完整性：
 - 1) 主控上位机应完整记录每次试验的原始数据和结果数据，保证记录内容可追溯、可复核。
 - 2) 不得只保留统计结果而缺失原始遥测和过程记录。
- g) 捕获成功判据预先统一：在正式试验前，应明确“捕获成功”的判据，并在整个试验过程中保持一致。例如可规定：终端在规定时间内输出有效捕获标志，且该状态连续保持达到规定时长，方记为捕获成功。

5.3.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 设备工作判定：试验过程中，地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机均应工作正常；若任一设备出现影响试验有效性的异常，则该次试验结果无效，不纳入正式统计。
- b) 单次捕获成功判定：
 - 1) 当星载激光通信终端在规定测试条件下完成目标探测与捕获，并满足以下条件时，判定为单次捕获成功：
 - 2) 主控上位机接收到终端输出的有效捕获状态标志；
 - 3) 终端相关遥测量与捕获状态一致；
 - 4) 捕获状态连续保持达到规定持续时间；
 - 5) 试验过程中无通信中断、终端异常复位或其他导致结果失真的情况。
 - 6) 若上述条件任一不满足，则判定为单次捕获失败。
- c) 捕获概率判定：
 - 1) 在规定试验条件下完成不少于规定次数的重复试验后，按捕获概率计算公式得到最终结果。
 - 2) 当计算得到的捕获概率不低于技术指标要求时，判定捕获概率试验合格；否则判定不合格。
 - 3) 若技术指标规定为： $P \geq 95\%$ ，则应满足捕获概率不小于 0.95。
- d) 分工况判定：对于不同波长、不同功率等级或不同工作模式下开展的分组试验，应分别统计、分别判定，不得以某一工况下的测试结果替代其他工况要求。

5.3.5 捕获时间

5.3.5.1 测试配置

5.3.5.1.1 捕获时间试验采用地面模拟远场来光方式进行，测试设备由地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机构成。各设备组成及功能如下。

- a) 地检光源（波长、功率可调）：地检光源用于模拟对端激光通信终端发出的信标光或捕获用信号光，其输出波长、功率应可调，能够覆盖被测星载激光通信终端规定的接收波段及功率范围。

在捕获时间试验中，地检光源应具备稳定开启、关闭和连续输出能力，并能在试验过程中保持设定波长和功率稳定，避免因光源不稳定导致捕获时间测量偏差；

- b) 平行光管：平行光管用于将地检光源输出光束准直，形成模拟远距离目标来光的平行光束。平行光管应满足被测终端口径和捕获视场要求，保证入射光束光轴稳定、准直良好，并能在整个试验过程中保持固定的几何关系和入射条件。其作用是使被测终端接收条件尽可能接近真实远距离激光链路环境；
- c) 星载激光通信终端：星载激光通信终端为被测对象，应处于完整工作状态。终端内部包含二维转台、捕获跟踪组件、探测器、控制处理单元等，可在主控上位机控制下完成捕获流程启动、目标判识、状态输出及遥测上传。试验中，终端应处于可重复初始化的工作状态，并能够输出清晰、可识别的捕获状态标志、模式状态及相关遥测量，以便准确确定捕获起止时刻；
- d) 主控上位机：
 - 1) 主控上位机用于完成试验控制、遥测采集、时间标记、状态监视和试验数据记录。
 - 2) 主控上位机应具备如下功能：
 - (1) 对星载激光通信终端下发捕获模式控制指令；
 - (2) 设置或读取终端工作参数；
 - (3) 记录捕获流程起始时刻；
 - (4) 记录捕获成功状态出现时刻；
 - (5) 实时显示终端捕获状态、转台状态和关键遥测量；
 - (6) 存储试验原始数据并计算捕获时间。
- e) 测试连接关系：
 - 1) 试验时，地检光源输出的模拟信号光经平行光管形成准直光束后，射入星载激光通信终端接收光路；主控上位机与星载激光通信终端建立遥控遥测链路，对终端进行模式切换、状态监视、时间记录和结果存储；
 - 2) 测试配置框图如下所示：

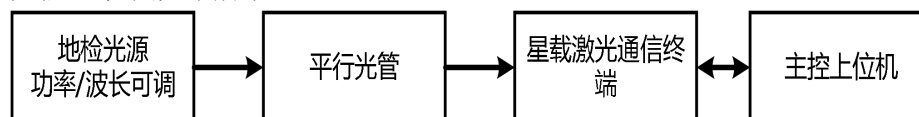


图 11 捕获时间测试框图

5.3.5.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：
 - 1) 按测试配置完成地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机的安装与连接。检查各设备供电、通信和软件状态，确认主控上位机能够正常完成遥控下发、遥测采集和数据记录。设置地检光源输出波长，使其符合被测终端接收波段要求；根据试验要求设置初始输出功率。对地检光源和平行光管进行光轴调整，确保平行光管输出的准直光束准确进入被测终端接收光学口径。对星载激光通信终端进行上电自检，确认二维转台、捕获组件、控制处理单元和遥测输出均工作正常。
 - 2) 通过主控上位机将终端设置为捕获时间测试模式，并完成相关参数初始化。明确捕获时间测量的起始判据和结束判据，并在试验前统一固化。
- b) 基准工况确认：在较优对准和适当功率条件下进行基准联调，通过上位机观察遥测参数，确认终端能够正常识别目标光并进入捕获流程。记录基准光源波长、功率、终端模式、遥测状态等信息，作为后续重复试验的统一参考工况。
- c) 单次捕获时间试验实施：
 - 1) 将星载激光通信终端置于规定的初始未捕获状态，使地检光源处于设定工况，通过平行光管向终端提供模拟远场目标来光。由主控上位机下发捕获启动指令，或将终端切换至自动捕获工作状态，以主控上位机发出启动指令时刻，或系统进入捕获流程的规定状态时刻，作为捕获时间测量起点，终端执行目标搜索、检测、判识和捕获建立过程。
 - 2) 主控上位机实时采集并记录以下数据：

- (1) 捕获启动时刻;
 - (2) 地检光源波长和功率设置值;
 - (3) 终端工作模式和状态变化;
 - (4) 关键遥测量变化过程;
 - (5) 捕获成功标志出现时刻;
 - (6) 试验过程中异常或中断信息。
- 3) 当终端满足预先定义的捕获成功判据时, 记录该时刻为捕获完成时刻。
 - 4) 按下式计算单次捕获时间:

$$T=t_2-t_1\ldots\ldots\ldots (3)$$

式中:

T——为单次捕获时间;

t₁——为捕获启动时刻;

t₂——捕获成功时刻。

- 5) 记录本次试验捕获时间结果, 并将终端恢复至初始未捕获状态。
- d) 重复试验: 在相同测试条件下重复进行多次捕获时间试验, 每次试验前应确认地检光源、平行光管、终端状态及初始条件一致。重复试验次数应不少于规定值, 通常不少于 10 次; 如规范或型号要求更高, 应按要求执行。对不同波长、不同功率等级、不同工作模式或不同初始条件下的试验结果, 应分别记录和统计。
- e) 数据处理:
 - 1) 对各次试验得到的捕获时间进行整理, 统计单次值、最大值、最小值和平均值, 必要时可计算标准差等离散性指标, 用于评价捕获时间稳定性。
 - 2) 对于因设备故障、通信中断、异常复位或明显非正常工况导致的无效数据, 应单独标记并说明原因。
 - 3) 当技术要求规定的是“单次最大捕获时间”时, 应以全部有效试验中的最大值作为判定依据; 当技术要求规定的是“平均捕获时间”时, 应以平均值作为判定依据, 并在报告中注明统计方法。

5.3.5.3 注意事项

注意事项如下:

- a) 起止时刻定义必须统一: 捕获时间试验最关键的是起点和终点定义必须明确且一致。通常应在试验前明确规定: 起点是主控上位机下发捕获启动指令时刻, 还是终端正式进入捕获流程时刻; 终点是终端首次输出捕获标志时刻, 还是捕获状态连续保持达到规定时长后的确认时刻, 如前后试验采用不同定义, 则结果不得直接比较。
- b) 光源工况应稳定一致: 地检光源输出波长和功率应在单次试验全过程保持稳定。若光源功率在试验中发生明显波动, 将直接影响目标检测阈值和捕获建立过程, 从而影响捕获时间测量结果。
- c) 平行光管对准应可靠: 平行光管输出光束应稳定进入被测终端接收光路, 不得因光轴漂移、准直偏差或机械松动导致入射条件变化。在多次重复试验中, 应定期检查光轴一致性, 防止因对准漂移导致捕获时间发生非系统性变化。
- d) 终端初始状态应一致: 每次试验前, 星载激光通信终端应恢复至统一初始状态, 包括工作模式、二维转台状态、捕获状态、参数设置、内部缓存状态等。若初始条件不同, 终端进入捕获流程的准备时间可能不同, 从而使结果缺乏可比性。
- e) 主控上位机时间记录应准确: 主控上位机应保证时间记录精度满足试验需求, 时间分辨率应明显优于被测捕获时间指标。当捕获时间指标为秒级或更高精度要求时, 上位机的时间戳精度和软件触发延迟应经过验证。
- f) 环境条件应受控: 试验环境应避免杂散光、振动、气流和温度剧烈变化, 必要时应采取遮光、防振和恒温措施, 以降低环境对捕获流程的影响。

- g) 异常工况应单独处理：若试验过程中出现如下情况，应视为异常工况并单独记录，不应直接并入正常统计结果：主控上位机通信异常、终端异常复位、光源异常熄灭或功率突变、平行光管光轴明显偏移或者遥测数据丢失或时间记录错误。

5.3.5.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 单次试验有效性判定：当以下条件同时满足时，该次捕获时间试验结果有效，若任一条件不满足，则该次试验结果无效，不纳入正式统计：
 - 1) 地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机工作正常；
 - 2) 试验过程中无通信中断、设备异常复位或严重遥测丢失；
 - 3) 捕获启动时刻和捕获完成时刻可明确识别；
 - 4) 光源、光轴及终端初始状态符合规定测试条件。
- b) 不确定区域判定规则：
 - 1) 标准考核不确定区域：轨道预报与姿态叠加综合不确定区域为 ± 1 mrad（方位、俯仰双向）；目标光束偏移 $\leq \pm 1$ mrad（含边界 ± 1 mrad点），判定为标准考核工况，严格考核捕获时间指标；
 - 2) 超范围非考核区域：目标光束偏移 $> \pm 1$ mrad，判定为大范围未知空域，该工况仅记录数据，不参与指标合格判定。
- c) 单次捕获完成判定：当星载激光通信终端在规定测试条件下完成目标探测和捕获，并满足以下条件时，判定该次捕获完成：
 - 1) 主控上位机接收到终端输出的有效捕获成功标志；
 - 2) 相关遥测参数与捕获建立状态一致；
 - 3) 捕获状态连续保持达到规定持续时间；
 - 4) 试验过程中不存在影响结果有效性的异常。
- d) 捕获时间判定：单次捕获时间按捕获启动时刻与捕获成功时刻之差计算：
 - 1) 标准工况（目标 $\leq \pm 1$ mrad）：初始捕获时间最大值 ≤ 15 s、重捕获时间最大值 ≤ 10 s，满足则该项单次试验合格；若时长超限，判定单次试验不合格；
 - 2) 超范围工况（目标 $> \pm 1$ mrad）：捕获时间不受 15 s 指标约束，时长超限仅作为设备边界特性记录，不判定不合格。
- e) 统计判定：若规范要求按平均值判定，则应以所有有效试验结果的平均捕获时间作为最终结果；若规范要求按最大值判定，则应以所有有效试验结果中的最大捕获时间作为最终结果，具体采用何种判据，应在试验前于试验细则中明确；
- f) 分工况判定：对不同波长、不同功率等级、不同模式或不同初始条件下的捕获时间测试结果，应分别进行统计和判定，不得以某一组工况结果代替全部工况要求。

5.3.6 扫描方式

5.3.6.1 测试配置

扫描方式试验用于验证星载激光通信终端捕获阶段扫描功能的正确性和参数可控性。试验设备由星载激光通信终端和主控上位机构成。

- a) 星载激光通信终端：
 - 1) 星载激光通信终端为被测对象，内部包含：二维转台、振镜、捕获跟踪控制单元；
 - 2) 终端应支持圆螺旋扫描、方螺旋扫描和矩形行扫三种扫描方式，并能够根据任务需求进行扫描方式选择；
 - 3) 圆螺旋扫描应支持设置扫描不确定区域半径、扫描步长、扫描点时间间隔、扫描起始点和扫描方向；
 - 4) 方螺旋扫描应支持设置扫描范围、扫描步长、扫描点时间间隔、扫描起始点和扫描方向；
 - 5) 矩形行扫应支持设置方位扫描范围、俯仰扫描范围、行间距、扫描点时间间隔、扫描起始点和扫描方向；

- 6) 二维转台与振镜均应具备独立扫描能力,并可分别进行圆螺旋扫描、方螺旋扫描和矩形行扫测试。
- b) 主控上位机:
- 1) 主控上位机用于完成:扫描模式设置、扫描参数配置、扫描启动与停止控制、二维转台角度遥测采集、振镜角度遥测采集、扫描轨迹记录和数据存储与显示;
 - 2) 主控上位机应能够实时记录:扫描角度序列、扫描时间序列、扫描点序号和扫描模式参数;
 - 3) 主控上位机应能够根据记录数据重构不同扫描方式下的二维扫描轨迹,并对扫描范围、扫描步长、扫描时间间隔和扫描覆盖情况进行分析。
- c) 测试连接关系:主控上位机通过遥控遥测接口与星载激光通信终端连接,对终端扫描功能进行控制并采集扫描数据。测试配置关系如下图 12 所示:

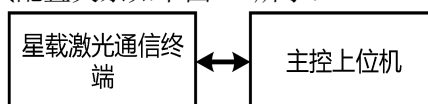


图 12 扫描方式测试框图

5.3.6.2 操作步骤

操作步骤如下:

- a) 试验准备:启动星载激光通信终端并完成自检,启动主控上位机软件,建立上位机与终端通信链路,检查二维转台和振镜遥测数据是否正常,将终端设置为扫描测试模式。扫描开始前,应清零角度记录数据,并确认二维转台和振镜均处于允许扫描范围内。
- b) 二维转台圆螺旋扫描测试:在主控上位机设置二维转台扫描方式为圆螺旋扫描,设置扫描不确定区域半径、扫描步长、扫描点时间间隔、扫描中心位置和扫描方向(螺旋旋向、方位轴转向、俯仰轴转向)。然后下发扫描启动指令,终端二维转台执行圆螺旋扫描。圆螺旋扫描应从扫描中心附近开始,按照逐渐向外扩展的圆形螺旋轨迹完成搜索,直至覆盖设定扫描区域。扫描过程中,主控上位机记录以下数据:
 - 1) 方位角序列;
 - 2) 俯仰角序列;
 - 3) 扫描时间序列;
 - 4) 扫描点序号;
 - 5) 扫描方式和扫描参数
 - 6) 扫描完成后停止扫描;
 - 7) 保存扫描轨迹数据。
- c) 二维转台方螺旋扫描测试:在主控上位机设置二维转台扫描方式为方螺旋扫描,设置扫描范围、扫描步长、扫描点时间间隔、扫描中心位置和扫描方向(螺旋旋向、方位轴转向、俯仰轴转向)。然后下发扫描启动指令,终端二维转台执行方螺旋扫描。方螺旋扫描应从扫描中心开始,按照水平和垂直方向交替扩展的方形路径逐圈向外搜索,直至覆盖设定扫描区域。扫描过程中,主控上位机记录以下数据:
 - 1) 方位角序列;
 - 2) 俯仰角序列;
 - 3) 扫描时间序列;
 - 4) 扫描点序号;
 - 5) 扫描方式和扫描参数
 - 6) 扫描完成后停止扫描;
 - 7) 保存扫描轨迹数据。
- d) 二维转台矩形行扫测试:在主控上位机设置二维转台扫描方式为矩形行扫,设置方位扫描范围、俯仰扫描范围、行间距、扫描点时间间隔、扫描中心位置和扫描方向(单行方位扫描走向、俯仰换行递进走向)。然后下发扫描启动指令,终端二维转台执行矩形行扫。矩形行扫应在设定矩形区域内按照逐行扫描方式进行搜索。扫描过程中,终端先完成一行扫描,再按照设定行间距换行,继续下一行扫描,直至覆盖完整矩形区域。扫描过程中,主控上位机记录以下数据:

- 1) 方位角序列;
 - 2) 俯仰角序列;
 - 3) 扫描时间序列;
 - 4) 扫描点序号;
 - 5) 扫描方式和扫描参数;
 - 6) 扫描完成后停止扫描;
 - 7) 保存扫描轨迹数据。
- e) 振镜圆螺旋扫描测试: 在工控上位机设置振镜扫描方式为圆螺旋扫描, 设置扫描不确定区域半径、扫描步长、扫描点时间间隔、扫描中心位置和扫描方向(螺旋旋向、X轴转向、Y轴转向)。下发扫描启动指令, 振镜执行圆螺旋扫描。圆螺旋扫描应从振镜扫描中心附近开始, 并逐渐向外扩展, 直至覆盖设定扫描区域。扫描过程中, 工控上位机记录以下数据:
- 1) X轴振镜角度;
 - 2) Y轴振镜角度;
 - 3) 扫描时间序列;
 - 4) 扫描点序号;
 - 5) 扫描方式和扫描参数;
 - 6) 扫描完成后停止扫描;
 - 7) 保存扫描轨迹数据。
- f) 振镜方螺旋扫描测试: 在工控上位机设置振镜扫描方式为方螺旋扫描, 设置扫描范围、扫描步长、扫描点时间间隔、扫描中心位置和扫描方向(螺旋旋向、X轴转向、Y轴转向)。下发扫描启动指令, 振镜执行方螺旋扫描。方螺旋扫描应从振镜扫描中心开始, 按照方形路径逐圈向外扩展, 直至覆盖设定扫描区域。扫描过程中, 工控上位机记录以下数据:
- 1) X轴振镜角度;
 - 2) Y轴振镜角度;
 - 3) 扫描时间序列;
 - 4) 扫描点序号;
 - 5) 扫描方式和扫描参数;
 - 6) 扫描完成后停止扫描;
 - 7) 保存扫描轨迹数据。
- g) 振镜矩形行扫测试: 在工控上位机设置振镜扫描方式为矩形行扫, 设置X轴扫描范围、Y轴扫描范围、行间距、扫描点时间间隔、扫描中心位置和扫描方向(单行X轴扫描走向、Y轴换行递进走向)。下发扫描启动指令, 振镜执行矩形行扫。矩形行扫应在设定矩形区域内逐行完成扫描搜索, 直至覆盖完整扫描区域。扫描过程中, 工控上位机记录以下数据:
- 1) X轴振镜角度;
 - 2) Y轴振镜角度;
 - 3) 扫描时间序列;
 - 4) 扫描点序号;
 - 5) 扫描方式和扫描参数;
 - 6) 扫描完成后停止扫描;
 - 7) 保存扫描轨迹数据。
- h) 扫描轨迹分析: 工控上位机对记录数据进行处理, 重构圆螺旋扫描、方螺旋扫描和矩形行扫的扫描轨迹, 绘制二维扫描图, 检查扫描范围、扫描步长、扫描点间时间间隔和扫描覆盖情况。其中, 圆螺旋扫描重点检查轨迹是否由中心向外连续扩展; 方螺旋扫描重点检查轨迹是否按照方形路径逐圈外扩; 矩形行扫重点检查轨迹是否按照逐行方式完整覆盖设定矩形区域。

5.3.6.3 注意事项

扫描中心应设置为终端零位或指定参考点, 扫描参数设置应在机构允许范围内。二维转台与振镜测试应分别进行, 避免两者同时扫描导致测试数据难以区分。圆螺旋扫描、方螺旋扫描和矩形行扫应分别完成测试, 不同扫描方式切换前应先停止当前扫描, 并确认终端状态正常。扫描过程中不得触发限位保

护，主控上位机记录频率应高于扫描频率，扫描测试过程中终端应处于稳定供电状态，应避免在扫描过程中切换工作模式。扫描开始前应清零角度记录数据。若出现扫描中断、通信异常、限位保护或轨迹异常，应停止当前测试，排查原因后重新开始测试。

5.3.6.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 圆螺旋扫描功能判定：当二维转台和振镜能够按设定参数完成圆螺旋扫描，且扫描轨迹能够从扫描中心附近开始逐渐向外扩展，轨迹连续、无跳变、无中断时，判定圆螺旋扫描功能正常；
- b) 方螺旋扫描功能判定：当二维转台和振镜能够按设定参数完成方螺旋扫描，且扫描轨迹能够从扫描中心开始，按照方形路径逐圈向外扩展，水平和垂直方向扫描正确，轨迹无异常跳变、无中断时，判定方螺旋扫描功能正常；
- c) 矩形行扫功能判定：当二维转台和振镜能够按设定参数完成矩形行扫，且扫描轨迹能够按照逐行方式覆盖设定矩形区域，行间距正确，换行过程稳定，轨迹无异常跳变、无中断时，判定矩形行扫功能正常；
- d) 扫描范围判定：实际扫描范围应覆盖设定扫描区域，圆螺旋扫描应覆盖设定扫描半径范围，方螺旋扫描应覆盖设定方形扫描范围，矩形行扫应覆盖设定矩形扫描范围，扫描范围偏差不超过规定误差范围；
- e) 扫描步长判定：实际扫描步长应与设定扫描步长一致，偏差不超过允许误差，且步长变化应连续、平滑；
- f) 扫描时间间隔判定：扫描点时间间隔应与设定时间间隔一致，偏差不超过允许误差，扫描时间间隔应稳定，无明显抖动；
- g) 扫描覆盖判定：扫描轨迹应能够覆盖设定不确定区域，无明显扫描盲区，扫描路径连续，不得出现异常断点或异常越界；
- h) 二维转台与振镜独立判定：二维转台和振镜均应具备独立执行圆螺旋扫描、方螺旋扫描和矩形行扫的能力，扫描参数可设置，轨迹正确，扫描稳定。二维转台和振镜均满足要求时，判定扫描方式试验合格。

5.3.7 捕获视场范围

5.3.7.1 测试配置

捕获视场范围试验用于验证星载激光通信终端捕获阶段能够实现目标捕获的最大角度范围。试验采用地面模拟远场目标入射光方式，通过振镜改变入射光方向，实现不同角度条件下的捕获能力测试。测试设备如下：

- a) 地检光源（波长、功率可调）：地检光源用于模拟对端激光通信终端发出的捕获信标光。光源输出波长应与被测终端接收波段一致，输出功率可调，用于保证不同角度条件下的捕获测试具有一致的光照条件。地检光源应具备稳定连续输出能力，试验过程中功率波动应控制在允许范围内。
- b) 平行光管：平行光管用于将地检光源输出光束准直，形成远距离目标入射光。准直后的光束经振镜反射后进入被测星载激光通信终端接收光路，从而模拟不同方向的远场目标来光。平行光管应保证输出光束方向稳定，波前质量满足捕获视场测试要求。
- c) 振镜：振镜用于调节入射光束方向，实现捕获视场范围扫描。振镜应具备二维角度控制能力，可实现：方位方向角度偏转、俯仰方向角度偏转和二维角度组合扫描。振镜扫描范围应大于被测终端捕获视场范围，角度分辨率应满足测试精度要求。
- d) 星载激光通信终端：星载激光通信终端为被测对象，内部包含：二维转台、捕获探测组件、捕获控制单元和捕获状态输出模块。终端在可控上位机控制下执行捕获流程，并输出捕获成功状态及相关遥测参数。
- e) 主控上位机：主控上位机用于控制振镜扫描角度、设置终端捕获模式、记录捕获成功状态、记录振镜角度、计算捕获视场范围和存储测试数据。
- f) 测试连接关系：测试设备连接关系如图 13：

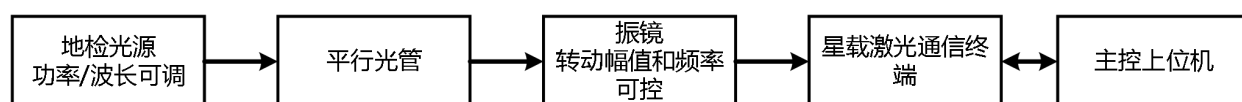


图 13 捕获视场范围测试框图

5.3.7.2 操作步骤

操作步骤如下：

- 试验准备：按测试配置完成设备安装与连接，启动地检光源并设置输出波长，设置地检光源输出功率并调整平行光管光轴，调整振镜初始角度为零位，确保光束进入星载终端接收口径，然后启动星载激光通信终端，启动主控上位机软件。建立通信链路，将终端设置为捕获模式。
- 中心视场捕获验证：振镜角度设置为零，启动捕获流程，确认终端能够正常捕获目标并记录捕获成功状态作为基准视轴方向。
- 方位方向捕获视场测试：
 - 设置振镜俯仰角为零，振镜方位角逐步增加，例如： $0 \rightarrow +01 \rightarrow +02 \rightarrow +03$ ，每个角度点执行捕获测试，记录捕获是否成功，直到捕获失败为止，记录最大捕获角度。
 - 重复测试：负方向： $0 \rightarrow -01 \rightarrow -02 \rightarrow -03$ ，得到负方向捕获视场。
- 俯仰方向捕获视场测试：设置振镜方位角为零，振镜俯仰角逐步增加，重复捕获测试并记录最大捕获角，测试正负方向。
- 捕获视场计算：捕获视场范围定义为：终端能够完成捕获的最大角度范围，通过记录得到的最大方位角，最大俯仰角，捕获视场表示为： $\pm \theta_{az} \times \pm \theta_{e_1}$ 。

5.3.7.3 注意事项

注意事项如下：

- 振镜角度应经过标定：确保振镜角度与实际入射角一致；
- 光源功率应保持稳定：避免因光强变化影响捕获能力；
- 每个角度点应重复测试：避免偶然捕获导致误判；
- 捕获判据应统一：例如捕获状态持续 ≥ 1 s；
- 扫描步长应合理：捕获视场测试步长 $\leq$ 视场 $1/10$ ；
- 测试顺序建议由小到大：避免直接跳出捕获视场；
- 振镜扫描应稳定：避免角度抖动影响测试结果；
- 测试环境避免杂散光：避免背景光影响捕获。

5.3.7.4 判定准则

判定准则如下：

- 捕获成功判定：当终端满足以下条件时判定为捕获成功：
 - 输出捕获成功标志；
 - 捕获状态稳定；
 - 遥测状态正常。
- 捕获视场边界判定：当在某角度下，连续多次捕获失败，则该角度视为超出捕获视场范围。
- 合格判定：当测得捕获视场满足技术指标要求时判定合格。

5.3.8 无、有信标光

5.3.8.1 测试配置

5.3.8.1.1 有/无信标光试验用于验证星载激光通信终端在不同来光束散角条件下的目标捕获能力。试验采用地面模拟远场来光方式进行，通过调整地检光源输出波长、功率及束散角，分别模拟有信标光和无信标光两种工作场景，考核终端对大束散角信标光和小束散角信号光的捕获能力。

5.3.8.1.2 测试设备包括：

- a) 地检光源（波长、功率、束散角可调）：地检光源用于模拟对端激光通信终端发出的来光信号。其输出参数应至少包括波长、功率和束散角可调功能，以满足不同工作模式下的目标光模拟要求；
- b) 地检光源应具备以下能力：
- 1) 输出波长可调，并与被测终端接收波段匹配；
 - 2) 输出功率可调，并能够覆盖终端捕获测试所需的动态范围；
 - 3) 输出束散角可调，用于模拟不同模式下的目标来光特性。
- 注：在有信标光模式下，地检光源输出大束散角光束，束散角范围宜为1 mrad~2 mrad，用于模拟对端信标光；在无信标光模式下，地检光源输出小束散角光束，束散角范围宜为50 μ rad~100 μ rad，用于模拟对端信号光条件下的捕获场景。地检光源在试验过程中应保持波长、功率和束散角稳定，避免因光源参数漂移影响试验结果。
- c) 平行光管：用于将地检光源输出光束进行准直或远场条件整形，使进入被测终端的来光具备明确、可控的方向性和远距离传播等效特征。平行光管应满足以下要求：
- 1) 能够适配地检光源的大束散角和小束散角输出工况；
 - 2) 输出光束应稳定、均匀，并满足远场模拟要求；
 - 3) 光轴方向应可校准，并与星载激光通信终端接收视轴建立明确的几何对应关系。
- d) 星载激光通信终端：星载激光通信终端为被测对象，内部包含二维转台、捕获探测组件、控制处理单元和状态输出模块等。终端应能够在主控上位机控制下完成捕获模式切换、目标检测、目标判识、捕获状态输出及遥测上传。
- e) 试验中，终端应在完整工作状态下参加测试，并具备以下能力：
- 1) 支持有信标光模式捕获；
 - 2) 支持无信标光模式捕获；
 - 3) 能够输出捕获状态、模式状态及相关遥测量；
 - 4) 能够在重复试验中恢复到统一初始状态。
- f) 主控上位机：用于完成试验过程中的遥控、遥测、状态监视和数据记录功能。其主要功能包括：
- 1) 设置终端工作模式；
 - 2) 控制试验开始和结束；
 - 3) 记录光源工作参数和终端工作状态；
 - 4) 采集捕获状态、关键遥测参数和异常信息；
 - 5) 统计各模式下捕获成功次数和捕获能力结果；
 - 6) 保存原始试验数据和最终试验结论。
- g) 测试连接关系：试验时，地检光源输出设定束散角、设定波长和功率的光束，经平行光管形成远场模拟来光后进入星载激光通信终端；主控上位机与终端建立遥控遥测链路，实现试验控制和数据记录。测试配置关系见图 14：

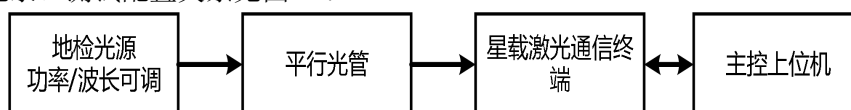


图 14 有无信标光测试框图

5.3.8.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：按测试配置完成地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机的安装与连接。检查各设备供电、通信及软件状态，确认系统工作正常。调整地检光源与平行光管的光轴，使输出光束准确进入星载激光通信终端接收光学口径。启动星载激光通信终端并完成上电自检，确认终端工作正常。启动主控上位机，建立与终端的遥控遥测通信链路。明确有信标光模式和无信标光模式下的试验参数、捕获成功判据和记录方式；
- b) 有信标光模式试验：
- 1) 将地检光源设置为有信标光工作模式，设置输出波长为被测终端对应接收波段。设置输出功率为规定测试值，设置束散角为大束散角工况，宜为1 mrad~2 mrad。将星载激光通

信终端设置为有信标光捕获模式。由主控上位机下发捕获启动指令，终端进入捕获流程。主控上位机实时记录以下信息：光源波长、功率、束散角设置值、终端工作模式、捕获状态变化；

- 2) 完成一次试验后，将终端恢复至初始未捕获状态，在相同条件下重复多次试验，统计有信标光模式下的捕获结果，必要时可在不同功率等级和不同大束散角条件下分组开展试验。
- c) 无信标光模式试验：将地检光源设置为无信标光工作模式。设置输出波长为被测终端对应接收波段。设置输出功率为规定测试值，设置束散角为小束散角工况，宜为 $50\ \mu\text{rad}\sim 100\ \mu\text{rad}$ ，将星载激光通信终端设置为无信标光捕获模式，或设置为仅依赖小束散角来光进行捕获判识的工作模式。由主控上位机下发捕获启动指令，终端进入捕获流程。主控上位机实时记录以下信息：光源波长、功率、束散角设置值、终端工作模式、捕获状态变化，完成一次试验后，将终端恢复至初始未捕获状态，在相同条件下重复多次试验，统计无信标光模式下的捕获结果，必要时可在不同功率等级和不同小束散角条件下分组开展试验；
- d) 数据统计与结果分析：分别统计有信标光模式和无信标光模式下的总试验次数与捕获成功次数。分析不同束散角、不同功率和不同模式条件下的捕获能力差异，必要时可分别计算两种模式下的捕获概率、平均捕获时间或其他考核指标，对试验中出现的异常数据应单独标识，并在报告中说明原因和处理方式。

5.3.8.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 有/无信标光定义应明确：本试验中的“有信标光”是指采用大束散角来光模拟对端专用信标光条件；“无信标光”是指不采用大束散角专用信标光，而采用小束散角信号光条件验证终端捕获能力。试验前应在试验细则中对两种模式的定义、参数范围和判据予以统一；
- b) 光源参数应保持稳定：地检光源输出的波长、功率和束散角在单次试验过程中应保持稳定，若参数漂移较大，将直接影响终端接收能量分布和捕获判识结果；
- c) 平行光管应满足不同束散角工况：平行光管应能够适应大束散角与小束散角两种来光模拟要求，在切换测试模式时，应检查输出光束状态和对准关系，确保试验条件真实有效；
- d) 终端模式切换应准确：在有信标光和无信标光两类试验之间切换时，应确认星载激光通信终端已进入正确工作模式，避免模式配置错误导致结果失真；
- e) 初始条件应一致：每次重复试验前，终端均应恢复至统一初始状态，包括未捕获状态、参数配置状态和工作模式准备状态。不同模式下的试验应在各自一致的初始条件下进行，不得混合统计；
- f) 试验环境应受控：测试环境应尽量避免杂散光、振动和温度变化对捕获结果造成干扰。必要时应采用遮光、防震和恒温措施；
- g) 结果记录应完整：主控上位机应完整记录每次试验的原始遥测、模式设置、光源参数和试验结论，确保数据可追溯、可复核。

5.3.8.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 单次试验有效性判定：当以下条件同时满足时，该次试验结果有效；若任一条件不满足，则该次试验结果无效，不纳入正式统计。
 - 1) 地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机工作正常；
 - 2) 光源输出参数满足设定要求；
 - 3) 终端处于正确工作模式；
 - 4) 试验过程中无通信中断、设备异常复位和严重遥测丢失；
 - 5) 捕获结果可明确识别。
- b) 有信标光模式捕获判定：当地检光源工作在大束散角工况下，终端能够完成目标检测和捕获，并满足预先规定的捕获成功判据时，判定该次有信标光模式试验捕获成功。

- c) 无信标光模式捕获判定：当地检光源工作在小束散角工况下，终端能够在无专用大束散角信标条件下完成目标检测和捕获，并满足预先规定的捕获成功判据时，判定该次无信标光模式试验捕获成功。
- d) 模式能力判定：
 - 1) 当终端在规定试验条件下分别满足有信标光模式和无信标光模式的捕获能力要求时，判定终端具备相应的有/无信标光捕获能力。
 - 2) 若技术指标中对两种模式分别规定了捕获概率、捕获时间或最小功率要求，则应分别进行统计并分别判定。
- e) 分工况判定：对于不同波长、不同功率等级、不同束散角条件下的试验结果，应分别统计并分别判定。不得以某一束散角或某一功率工况结果替代其他要求工况。

5.3.9 跟踪精度

5.3.9.1 测试配置

跟踪精度试验用于验证星载激光通信终端在闭环跟踪状态下对目标光束的指向稳定性和跟踪误差。试验采用地面模拟远场来光方式，通过振镜注入微小角度扰动，测量终端跟踪误差并计算跟踪精度。测试设备包括：

- a) 地检光源：用于模拟对端激光通信终端发出的信号光。输出波长应与被测终端接收波段一致，输出功率应满足终端稳定跟踪要求。试验过程中地检光源应稳定输出连续光束，功率波动应控制在允许范围内，以避免对跟踪精度测量产生影响。
- b) 平行光管：用于将地检光源输出光束准直，形成远距离目标来光。准直后的光束经振镜反射后进入被测终端接收光路，从而模拟远场目标。平行光管输出光束应稳定，波前质量应满足跟踪精度测试要求。
- c) 振镜：用于调节入射光束方向，并用于注入小幅角度扰动。振镜应具备二维角度控制能力，并能够实现：静态角度偏置、微小扰动注入和稳定目标指向。
- d) 星载激光通信终端：为被测对象，内部包含：二维转台、精跟踪振镜、跟踪探测器和闭环跟踪控制单元。终端在工控上位机控制下进入跟踪模式，并输出：跟踪误差、振镜角度、转台角度和跟踪状态。
- e) 工控上位机：用于控制振镜角度、控制终端进入跟踪模式、采集跟踪误差数据、记录时间序列数据并计算跟踪精度、存储测试结果。
- f) 测试设备连接关系如图 15。

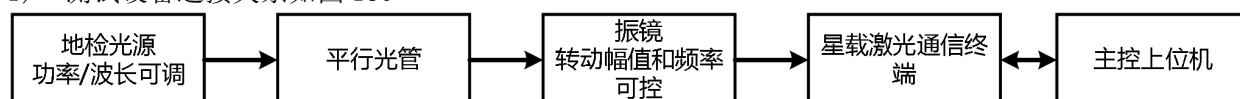


图 15 跟踪精度测试框图

5.3.9.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：启动地检光源、设置输出波长、设置输出功率、调整平行光管光轴、调整振镜初始角度、确保光束进入终端接收口径、启动星载激光通信终端、启动工控上位机、建立通信链路并设置终端进入跟踪模式；
- b) 建立稳定跟踪：振镜角度设置为零位，启动终端捕获流程，终端完成捕获并进入跟踪状态，确认终端进入稳定闭环跟踪，记录稳定状态；
- c) 静态跟踪精度测试：振镜保持固定角度，终端保持闭环跟踪，工控上位机记录跟踪误差，记录时间要求不小于 60 s。记录内容：跟踪误差 X、跟踪误差 Y、振镜角度和跟踪状态；
- d) 动态扰动下跟踪精度测试：振镜注入不同扰动 $\pm 5 \mu\text{rad}$ (100 Hz)、 $\pm 10 \mu\text{rad}$ (50 Hz)、 $\pm 20 \mu\text{rad}$ (10 Hz) 等，终端保持闭环跟踪，记录跟踪误差，并分析扰动下跟踪性能；
- e) 数据处理：工控上位机计算：分别计算：X 轴跟踪误差的 3σ 值和 Y 轴跟踪误差的 3σ 值。

5.3.9.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 光源功率应稳定：避免光强变化影响跟踪误差；
- b) 振镜角度应稳定：避免额外抖动；
- c) 跟踪状态必须稳定：禁止在捕获阶段记录数据；
- d) 数据记录时间应足够长：建议 ≥ 60 s；
- e) 测试环境应避免振动；
- f) 主控上位机采样率应足够高：建议 ≥ 100 Hz；
- g) 振镜扰动应小于跟踪视场：避免失锁。

5.3.9.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 跟踪精度计算：分别计算 X 轴跟踪误差的 3σ 值和 Y 轴跟踪误差的 3σ 值；
- b) 跟踪稳定判定：测试过程中应满足：无失锁、无跳变并且误差稳定；
- c) 合格判定：当跟踪精度满足技术指标要求时判定合格：跟踪精度 $\leq 5\text{ }\mu\text{rad}$ (3σ)。

5.3.10 跟踪视场

5.3.10.1 测试配置

跟踪视场试验用于验证星载激光通信终端在闭环跟踪状态下能够保持稳定跟踪的最大入射角范围。试验采用地面模拟远场来光方式，通过振镜改变入射光束方向，逐步扩大目标角度，测量终端失去稳定跟踪前的最大角度范围。测试设备包括：

- a) 地检光源：用于模拟对端激光通信终端发出的信号光。输出波长应与被测终端接收波段一致，输出功率应满足终端稳定跟踪要求。试验过程中光源应稳定输出，避免功率波动影响跟踪能力判断。
- b) 平行光管：用于将地检光源输出光束准直，形成远距离目标来光。准直光束经振镜反射后进入星载激光通信终端接收光路，用于模拟不同角度方向的远场目标。
- c) 振镜：用于调节入射光束方向，实现跟踪视场范围扫描。振镜应具备二维角度控制能力，可实现：方位方向角度偏转、俯仰方向角度偏转和二维角度组合扫描。振镜扫描范围应大于终端跟踪视场范围，角度分辨率应满足测试要求。
- d) 星载激光通信终端：为被测对象，内部包含：二维转台、精跟踪振镜、跟踪探测器和闭环跟踪控制单元。终端在可控上位机控制下进入稳定跟踪状态，并输出跟踪误差、振镜角度及跟踪状态。
- e) 主控上位机用于：控制振镜扫描角度、控制终端进入跟踪模式、采集跟踪状态、记录振镜角度、判断跟踪是否失锁并计算跟踪视场范围。
- f) 测试设备连接关系如下：

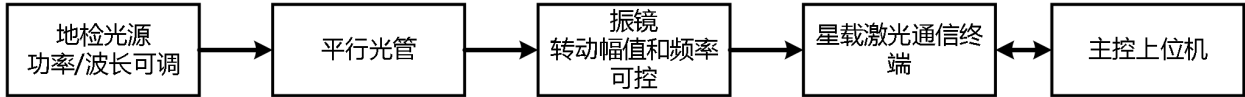


图 16 跟踪视场测试框图

5.3.10.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：
 - 1) 启动地检光源并设置输出波长；
 - 2) 设置地检光源输出功率；
 - 3) 调整平行光管光轴；
 - 4) 调整振镜初始角度为零位；
 - 5) 启动星载激光通信终端；
 - 6) 启动主控上位机；
 - 7) 建立通信链路；

- 8) 将终端设置为跟踪模式。
- b) 建立稳定跟踪：
 - 1) 振镜角度设置为零位；
 - 2) 启动终端捕获流程；
 - 3) 终端完成捕获并进入跟踪状态；
 - 4) 确认终端进入稳定闭环跟踪；
 - 5) 记录中心视轴位置。
- c) 方位方向跟踪视场测试：
 - 1) 保持振镜俯仰角为零；
 - 2) 振镜方位角逐步增加，例如： $0 \rightarrow \theta_1 \rightarrow \theta_2 \rightarrow \theta_3$ ；
 - 3) 每个角度保持稳定；
 - 4) 记录终端跟踪状态；
 - 5) 判断是否失锁；
 - 6) 直到终端失去跟踪，记录最大跟踪角度。
- d) 俯仰方向跟踪视场测试：
 - 1) 保持振镜方位角为零；
 - 2) 振镜俯仰角逐步增加；
 - 3) 重复跟踪测试；
 - 4) 记录最大跟踪角度。
- e) 跟踪视场计算：跟踪视场定义为终端能够保持稳定跟踪的最大角度范围，记录最大方位角 $\pm \theta_{az}$ ，最大俯仰角 $\pm \theta_{el}$ 。则跟踪视场最终表示为： $\pm \theta_{az} \times \pm \theta_{el}$ 。

5.3.10.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 振镜角度应经过标定：确保角度与实际入射角一致；
- b) 光源功率应保持稳定：避免影响跟踪能力；
- c) 必须在闭环跟踪状态下测试：禁止在捕获阶段记录数据；
- d) 角度步长应合理：步长 $\leq$ 跟踪视场 $1/10$ ；
- e) 每个角度应保持稳定时间： ≥ 2 s。

5.3.10.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 跟踪保持判定：当终端满足以下条件时判定为保持跟踪：输出跟踪状态、误差稳定并且无失锁；
- b) 跟踪失锁判定：当出现以下情况之一判定为失锁：跟踪状态丢失、误差超限、转台失稳；
- c) 跟踪视场边界判定：终端刚好失去跟踪前的角度为：跟踪视场边界；
- d) 跟踪视场计算：跟踪视场为： $\pm \theta_{az} \times \pm \theta_{el}$ ；
- e) 合格判定：当跟踪视场满足技术指标要求时判定合格。

5.3.11 跟踪带宽

5.3.11.1 测试配置

跟踪带宽试验用于验证星载激光通信终端精跟踪闭环系统对目标角度扰动的响应能力，并测量系统可稳定跟踪的频率范围。试验通过振镜作为角度扰动源，在不同频率和幅值条件下注入扰动信号，测量终端输出的跟踪误差响应，从而确定系统跟踪带宽。测试设备包括：

- a) 地检光源：用于提供稳定目标光源，模拟远距离通信目标。输出波长应与被测终端接收波段一致，输出功率应满足终端稳定跟踪条件。试验过程中光源应保持稳定连续输出，避免功率波动影响跟踪带宽测试结果；
- b) 平行光管：用于将地检光源输出光束准直，形成远场目标来光。准直光束经振镜反射后进入星载激光通信终端接收光路，用于模拟目标角度扰动；

- c) 振镜：作为角度扰动源，用于向终端注入可控角度扰动信号。振镜应具备以下能力：二维角度扰动输出、扰动幅值可调、扰动频率可调、正弦扰动输出和扫频扰动输出。振镜可输出如下扰动信号：正弦扰动： $\theta(t) = A \sin(2\pi ft)$ ，其中：A 为扰动幅值，f 为扰动频率，通过改变扰动频率，测量终端闭环响应能力；
- d) 星载激光通信终端：为被测对象，内部包含：二维转台、精跟踪振镜、跟踪探测器和闭环控制系统。终端在主控上位机控制下进入稳定闭环跟踪状态，并输出：跟踪误差、跟踪状态、振镜角度和控制量；
- e) 主控上位机：用于控制振镜扰动信号、设置扰动幅值、设置扰动频率、采集跟踪误差数据、记录时间序列、计算幅频响应、计算跟踪带宽；
- f) 测试设备连接关系见图 16：

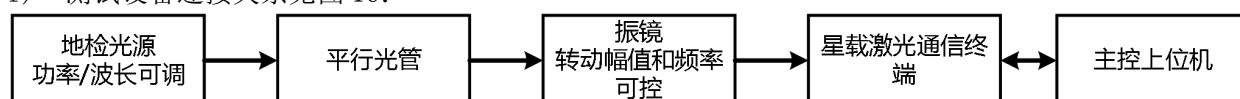


图 17 跟踪带宽测试框图

5.3.11.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：
 - 1) 启动地检光源；
 - 2) 设置输出波长；
 - 3) 设置输出功率；
 - 4) 调整平行光管光轴；
 - 5) 设置振镜零位；
 - 6) 启动星载激光通信终端；
 - 7) 启动主控上位机；
 - 8) 建立通信链路；
 - 9) 将终端设置为跟踪模式。
 - b) 建立稳定跟踪：
 - 1) 振镜角度为零；
 - 2) 终端完成捕获；
 - 3) 进入闭环跟踪状态；
 - 4) 确认跟踪稳定；
 - 5) 记录基准误差。
 - c) 扰动幅值设置：设置振镜扰动幅值和频率；
- 示例： $\pm 5 \mu\text{rad}$ (100 Hz)， $\pm 10 \mu\text{rad}$ (50 Hz)， $\pm 20 \mu\text{rad}$ (10 Hz)，扰动幅值应小于跟踪视场范围。
- d) 扫频测试：在不同频率点和不同幅值下，注入正弦扰动并记录终端跟踪误差，保持稳定时间；
 - e) 响应测量：主控上位机记录输入扰动角度，输出跟踪误差，计算幅值比和相位差，得到系统频率响应；
 - f) 带宽计算：跟踪带宽定义为系统幅值衰减为-3 dB 时的频率，记录 X 轴带宽，Y 轴带宽。

5.3.11.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 扰动幅值应保持恒定：避免影响带宽计算；
- b) 扫频应由低到高：避免失锁；
- c) 每个频率点应保持稳定时间： $\geq 5 \text{ s}$ ；
- d) 终端必须保持闭环跟踪：失锁数据无效；
- e) 振镜扰动应为正弦波：避免阶跃扰动；
- f) 采样频率应足够高： $\geq 10 \times$ 带宽。

5.3.11.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 跟踪带宽定义为系统闭环响应满足要求的最大频率范围。当输出幅值下降至：0.707 倍，对应频率为带宽；
- b) 误差判据：当跟踪误差超过指标要求时，对应频率为带宽上限；
- c) 合格判定：当跟踪带宽满足技术指标要求时判定合格：跟踪带宽 ≥ 100 Hz。

5.3.12 跟踪灵敏度

5.3.12.1 测试配置

跟踪灵敏度试验用于验证星载激光通信终端在闭环跟踪状态下对弱目标光的探测与稳定跟踪能力，确定终端能够保持正常跟踪的最小输入光功率。测试设备包括：

- a) 地检光源（波长、功率可调）：用于模拟对端激光通信终端发出的目标光。输出波长应与被测终端接收波段一致，输出功率应能够在较大动态范围内连续或分档调节，以覆盖终端从正常跟踪到接近失锁的全部测试范围。地检光源在整个试验过程中应保持波长稳定，并按设定步进逐级降低功率，以验证终端在弱光条件下的跟踪能力。在本试验中，地检光源应具备以下能力：
 - 1) 输出波长可调，并与终端接收波段匹配；
 - 2) 输出功率可调，且调节分辨率应满足灵敏度测试要求；
 - 3) 输出稳定连续光束，功率波动应控制在允许范围内。
- b) 平行光管：用于将地检光源输出光束准直，形成远距离目标来光，模拟真实链路中的远场入射条件。平行光管应满足以下要求：
 - 1) 输出准直光束稳定；
 - 2) 波前质量和方向稳定性满足终端跟踪测试要求；
 - 3) 与地检光源及被测终端之间的光轴关系明确、可校准。
- c) 星载激光通信终端：为被测对象，内部包含二维转台、精跟踪单元、探测器、闭环控制单元及状态输出模块等。终端应能够在主控上位机控制下完成捕获、进入闭环跟踪并持续输出以下信息：跟踪状态、跟踪误差、关键遥测参数、失锁状态或异常状态信息。终端应支持在重复试验中恢复至统一初始状态，以保证各次灵敏度测试结果具有可比性。
- d) 主控上位机：机用于实现试验控制、遥测采集、状态监视和数据记录。其主要功能包括：
 - 1) 控制终端进入捕获和跟踪模式；
 - 2) 记录地检光源各功率设置点；
 - 3) 实时采集终端跟踪状态、误差和关键遥测；
 - 4) 记录不同功率条件下终端是否保持稳定跟踪；
 - 5) 统计跟踪保持与失锁边界；
 - 6) 给出最小稳定跟踪功率测试结果。
- e) 测试连接关系：试验时，地检光源输出设定波长和设定功率的目标光，经平行光管形成远场模拟来光后进入星载激光通信终端；主控上位机与终端建立遥控遥测链路，对试验过程进行控制和记录。测试配置关系为：

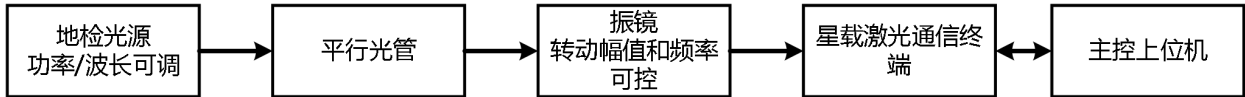


图 18 跟踪灵敏度测试框图

5.3.12.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：按测试配置完成地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机的安装与连接。检查各设备供电、通信和软件状态，确认系统工作正常。设置地检光源输出波长，使其与被测终端接收波段一致。将地检光源输出功率设置为较高初始值，确保终端能够稳定完成捕获并进入闭环跟踪。调整地检光源与平行光管的光轴，并确认准直光束准确进入被测终端接收口径。启动星载激光通信终端并完成自检，启动主控上位机，建立与终端的遥控遥测通信链路，明确跟踪保持判据、失锁判据和最小功率判定方法；

- b) 建立稳定跟踪：在较高光功率条件下启动终端捕获流程，终端完成目标捕获并进入稳定闭环跟踪状态。通过主控上位机确认终端跟踪状态正常，相关遥测参数稳定。记录基准工况下的光源波长、初始功率、终端模式和关键遥测参数；
- c) 功率逐级降低测试：在终端保持闭环跟踪状态下，按预定步进逐级降低地检光源输出功率。每降低一级功率后，保持该功率条件持续一定时间，观察终端是否仍能保持稳定跟踪。主控上位机应实时记录以下内容：地检光源波长和当前功率设置值、终端跟踪状态、跟踪误差变化和关键遥测参数、是否出现失锁、误差发散或状态异常。当终端在某一级功率下仍能持续满足稳定跟踪判据时，记该功率点为有效跟踪点。当终端在某一级功率下出现失锁、无法维持闭环跟踪或关键误差超限时，记该功率点为失效点。继续根据需要进行边界功率细化测试，以确定最小稳定跟踪功率；
- d) 边界功率细化测试：在最后一个有效跟踪功率点与首个失效功率点之间，采用更小功率步进进行细化测试。重复观察终端在边界附近功率条件下的跟踪保持能力。通过多次重复试验确定终端最小稳定跟踪功率；
- e) 重复试验：每完成一次灵敏度测量后，应将终端恢复至统一初始状态。在相同测试条件下重复进行多次试验，统计最小稳定跟踪功率结果，必要时可在不同波长、不同模式或不同工作状态下分别开展试验并分别统计；
- f) 数据处理：对各次试验结果进行整理，记录每个功率点下终端的跟踪状态。统计能够保持稳定跟踪的最低功率值，必要时可计算重复试验下最小稳定跟踪功率的平均值、最大值和离散性，对异常数据应单独标识，并说明原因及处理方式。

5.3.12.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 光源功率标定应准确：地检光源输出功率应经过标定，保证设定值与实际输出值一致。若光源功率控制存在较大误差，将直接影响灵敏度测试结果的准确性；
- b) 波长应保持一致：整个试验过程中地检光源波长应保持稳定，并与终端接收波段一致。不得在未说明条件变化的情况下改变波长并混合统计测试结果；
- c) 必须在闭环跟踪状态下进行功率递减：灵敏度测试应在终端已经完成捕获并进入稳定闭环跟踪后进行。不得将捕获阶段失败误判为跟踪灵敏度不足；
- d) 功率步进应合理：功率递减步进不宜过大，以免跳过真实边界点，在接近失锁边界时，应采用更小步进进行细化测试；
- e) 每个功率点应保持足够观察时间：终端在每个功率点下应保持足够长的观察时间，以确认其是否真正具备稳定跟踪能力，不得仅凭瞬时未失锁即判定为有效跟踪；
- f) 环境条件应受控：试验环境应避免杂散光、振动、气流和温度变化对弱光跟踪能力造成影响，必要时应采取遮光、防振和恒温措施。

5.3.12.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 单次试验有效性判定：当以下条件同时满足时，该次跟踪灵敏度试验结果有效。若任一条件不满足，则该次试验结果无效，不纳入正式统计。
 - 1) 地检光源、平行光管、星载激光通信终端和主控上位机工作正常；
 - 2) 光源输出波长和功率满足设定要求；
 - 3) 终端已进入闭环跟踪状态；
 - 4) 试验过程中无通信中断、设备异常复位和严重遥测丢失；
 - 5) 跟踪保持或失锁结果可明确识别。
- b) 稳定跟踪判定：当终端在某功率条件下满足以下条件时，判定该功率点可实现稳定跟踪：
 - 1) 主控上位机接收到有效跟踪状态标志；
 - 2) 跟踪误差在规定范围内；
 - 3) 跟踪状态连续保持达到规定观察时间；
 - 4) 试验过程中无异常复位或模式切换。

- c) 失锁判定：当终端在某一功率条件下出现以下情况之一时，判定该功率点失锁或不能稳定跟踪：
 - 1) 跟踪状态丢失；
 - 2) 跟踪误差明显超限并持续存在；
 - 3) 终端退出闭环跟踪状态；
 - 4) 遥测显示系统无法维持正常跟踪工作。
- d) 跟踪灵敏度定义：为终端在规定试验条件下能够保持稳定跟踪的最小来光功率。当采用功率阈值表示时，应给出该最小稳定跟踪功率值；
- e) 合格判定：当测得最小稳定跟踪功率满足技术指标要求时，判定跟踪灵敏度试验合格。

5.3.13 指向精度

5.3.13.1 测试配置

指向精度试验用于验证星载激光通信终端在静态目标条件下的指向能力，考核终端指向指定目标时，其输出方位角、俯仰角与目标真实方位角、俯仰角之间的偏差。本试验采用经高精度测量标定的静态靶标作为目标基准，通过星载激光通信终端自身二维转台转动完成对各靶标的指向。试验中不设置地检光源和平行光管，由静态靶标提供已知目标方向基准。测试设备包括：

- a) 高精度静态靶标：用于提供已知空间方向的目标基准。靶标应具有明确、可重复识别的目标中心，其空间位置及相对终端安装基准的方位角、俯仰角关系应通过经纬仪、激光跟踪仪或同等精度测量设备进行高精度标定。高精度静态靶标应满足以下要求：
 - 1) 靶标中心明确，便于终端识别和瞄准；
 - 2) 靶标安装位置稳定，不得在试验过程中发生位移或转动；
 - 3) 每个靶标对应的方位角、俯仰角应已完成精确标定；
 - 4) 标定精度应高于被测终端指向精度要求。
 - 5) 根据试验需要，可设置一个或多个静态靶标，覆盖终端典型工作范围内的不同方位和俯仰角位置。
- b) 星载激光通信终端：为被测对象，内部包含二维转台、指向控制单元、状态输出模块及相关测角装置。试验时终端通过自身二维转台转动，指向各静态靶标，并输出对应的方位角、俯仰角及相关遥测参数。终端应具备以下能力：
 - 1) 接收主控上位机下发的指向控制指令；
 - 2) 实现二维转台方位和俯仰方向的稳定转动；
 - 3) 输出当前指向角度；
 - 4) 在不同靶标位置下重复完成指向动作。
- c) 主控上位机：用于完成试验控制、靶标信息管理、终端状态监视、指向角数据采集和结果记录。其主要功能包括：
 - 1) 存储各静态靶标的标定方位角和俯仰角；
 - 2) 控制终端依次指向各靶标；
 - 3) 读取终端当前输出方位角和俯仰角；
 - 4) 记录各靶标对应的理论角度与终端实际指向角；
 - 5) 计算方位误差、俯仰误差和综合指向误差；
 - 6) 存储原始数据和试验结果。
- d) 测试连接关系：试验时，高精度静态靶标固定在已标定位置，星载激光通信终端在可控上位机控制下依次指向各靶标；主控上位机读取终端角度输出，并与靶标标定角度进行比较。测试配置关系见图 19：

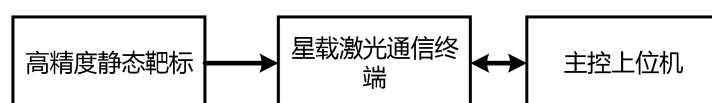


图 19 指向精度测试框图

5.3.13.2 操作步骤

操作步骤如下：

- 试验准备：完成高精度静态靶标的安装，并确认各靶标位置稳定可靠。使用经纬仪、激光跟踪仪或同等精度设备，对各静态靶标中心进行测量和标定，得到相对于终端安装基准的方位角和俯仰角。各靶标对应的标定方位角、俯仰角录入主控上位机。安装星载激光通信终端，确保终端安装基准与靶标标定所采用的坐标基准一致。启动星载激光通信终端并完成自检。启动主控上位机，建立与终端的遥控遥测通信链路。检查终端二维转台工作状态、角度输出状态及上位机数据显示是否正常。明确方位角误差、俯仰角误差和综合指向误差的计算方法；
- 基准靶标对准：选取基准靶标作为初始对准目标，由主控上位机下发指向指令，控制终端二维转台转动至基准靶标对应角度，终端完成指向后，读取其当前输出方位角和俯仰角。检查终端是否已稳定指向基准靶标，确认系统工作正常，记录基准靶标测试数据；
- 多靶标指向测试：按预定顺序选取其他静态靶标，主控上位机逐个下发指向命令，控制终端转动至对应靶标方向，每到达一个靶标位置后，等待终端稳定，读取并记录终端当前输出的方位角、俯仰角。将终端输出角度与该靶标的标定方位角、俯仰角进行比较，对每个靶标重复进行多次指向测试，记录重复性结果；
- 依次完成全部靶标测试；
- 误差计算：对每个靶标，计算终端指向误差：
方位角误差：

$$\Delta A_z = A_{z_{term}} - A_{z_{ref}} \cdots \cdots \cdots (4)$$

俯仰角误差：

$$\Delta E_l = E_{l_{term}} - E_{l_{ref}} \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中：

$A_{z_{term}}$ ——终端输出方位角；

$A_{z_{ref}}$ ——靶标标定方位角；

$E_{l_{term}}$ ——终端输出俯仰角；

$E_{l_{ref}}$ ——靶标标定俯仰角。

- 结果统计对各靶标测试结果分别统计方位误差和俯仰误差。统计最大误差、平均误差和均方根误差。对重复测试结果进行一致性分析，评价终端指向重复性。

5.3.13.3 注意事项

注意事项如下：

- 靶标标定精度应满足要求：高精度静态靶标的标定精度必须高于被测终端指向精度要求，否则将无法保证试验结果的有效性。靶标标定所采用的测量设备应具有足够精度，并提供标定结果和测量依据；
- 靶标中心应明确且可重复识别：静态靶标应具有清晰、唯一的目标中心，终端每次指向时均应以同一目标中心为基准。若靶标中心定义不清，将直接影响指向误差结果；
- 终端安装基准应与靶标标定基准一致：终端安装坐标系、靶标标定坐标系和试验数据处理坐标系应统一。若不同基准之间存在安装偏差，应在试验前完成基准转换或补偿；
- 终端应依靠自身二维转台完成指向：本试验应由星载激光通信终端自身二维转台完成各靶标之间的转动指向，不得依赖外部辅助机构替代终端完成目标对准；
- 每个靶标应保持足够稳定时间：终端到达目标角度后，应保持足够稳定时间再读取角度数据，避免因转台尚未稳定而引入附加误差；
- 靶标布设应覆盖典型工作范围：静态靶标应尽可能覆盖终端典型工作区域内的不同方位角和俯仰角，以全面反映终端在不同指向位置下的误差水平。

5.3.13.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 单次试验有效性判定：当以下条件同时满足时，该次指向精度试验结果有效：
 - 1) 高精度静态靶标、星载激光通信终端和主控上位机工作正常；
 - 2) 靶标标定结果明确且有效；
 - 3) 终端安装基准与靶标标定基准一致或已完成转换；
 - 4) 试验过程中无通信中断、设备异常复位和严重数据丢失；
 - 5) 终端输出角度和靶标参考角度可明确对应；
 - 6) 若任一条件不满足，则该次试验结果无效，不纳入正式统计。
- b) 单点指向误差判定：对每个靶标，应分别计算方位角误差和俯仰角误差。必要时可按综合指向误差进行评价。当某一靶标测试点的误差超过规定阈值时，应判定该点指向精度不满足要求；
- c) 指向精度定义：为终端输出方位角、俯仰角与对应靶标标定方位角、俯仰角之间的偏差。可采用以下一种或多种形式表征：
 - 1) 最大方位角误差；
 - 2) 最大俯仰角误差；
 - 3) 综合指向最大误差，小于 $15''$ ；
 - 4) 综合指向均方根误差。
- d) 合格判定：当全部规定测试点的方位、俯仰或综合指向误差均满足技术指标要求时，判定指向精度试验合格；
- e) 重复性判定：当重复测试条件下，各次指向结果波动在允许范围内时，可判定终端指向重复性满足要求。若重复测试结果离散性过大，应分析终端机械重复性、角度测量稳定性和靶标识别一致性。

5.3.14 自标校

5.3.14.1 测试配置

自标校试验用于验证星载激光通信终端通过内部自标校算法自动估计系统误差并进行补偿的能力。试验通过高精度静态靶标提供已知目标方向，分别测量自标校前后的指向误差，对比误差变化情况，从而评估终端自标校能力。测试设备包括：

- a) 高精度静态靶标：用于提供已知空间方向的目标基准。靶标中心位置及其相对终端安装基准的方位角、俯仰角应通过经纬仪、激光跟踪仪或同等精度测量设备进行标定。静态靶标应满足以下要求：
 - 1) 靶标中心明确；
 - 2) 安装稳定；
 - 3) 多靶标分布覆盖终端工作范围；
 - 4) 标定精度高于终端指向精度指标；
 - 5) 多个靶标用于自标校参数估计及指向精度验证。
- b) 星载激光通信终端：为被测对象，内部包含：二维转台、捕获相机、精跟踪机构、指向控制单元、自标校算法模块。终端应具备以下功能：
 - 1) 关闭自标校模式；
 - 2) 开启自标校模式；
 - 3) 自动执行自标校流程；
 - 4) 输出补偿参数；
 - 5) 输出指向角度。
- c) 主控上位机用于：
 - 1) 控制终端工作模式；
 - 2) 控制执行自标校流程；
 - 3) 记录自标校前指向数据；
 - 4) 记录自标校后指向数据；
 - 5) 计算指向误差；
 - 6) 计算误差改善量；

- 7) 保存测试结果。
- d) 测试连接关系：如图 20 所示：

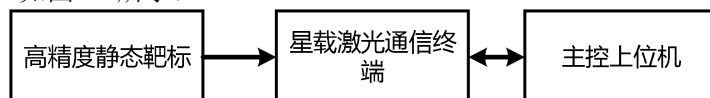


图 20 自标校测试框图

5.3.14.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 试验准备：完成高精度静态靶标安装，标定各靶标方位角和俯仰角，将靶标角度输入主控上位机，启动星载激光通信终端，建立遥控遥测通信，关闭终端自标校功能，将设置终端为手动指向模式。
- b) 自标校前指向精度测试：终端依次指向各静态靶标，记录终端输出方位角和终端输出俯仰角，并计算各靶标指向误差：方位误差 ΔAz_before 和俯仰误差 ΔEl_before 。
- c) 执行自标校：开启终端自标校模式，终端依次观测多个静态靶标，终端采集观测偏差数据，自标校算法估计系统误差，包括：
 - 1) 转台零位误差；
 - 2) 光轴安装误差；
 - 3) 正交误差；
 - 4) 比例误差；
 - 5) 终端更新补偿参数，自标校流程结束。
- d) 自标校后指向精度测试：终端再次依次指向各静态靶标，记录终端输出方位角，记录终端输出俯仰角，并计算自标校后指向误差： ΔAz_after 和 ΔEl_after 。
- e) 误差改善量计算：计算自标校前后误差变化：方位误差改善量： $\Delta A = \Delta Az_before - \Delta Az_after$ ；俯仰误差改善量： $\Delta E = \Delta El_before - \Delta El_after$ 。
- f) 重复验证：重新清除补偿参数，再次执行自标校，重复指向精度测试，验证自标校稳定性。

5.3.14.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 靶标数量应满足自标校需求：自标校至少需要三个以上靶标，靶标应分布在不同方位和俯仰角，避免共线分布；
- b) 自标校前必须清除补偿参数，确保测试为真实自标校能力；
- c) 靶标标定精度必须足够高，否则会影响自标校结果；
- d) 终端指向必须稳定，读取角度前应等待稳定；
- e) 自标校过程不得人为干预，确保为终端自主完成；
- f) 自标校前后测试条件应一致，避免环境变化影响结果；
- g) 靶标识别应一致，自标校前后应使用同一靶标。

5.3.14.4 判定准则

判定准则如下：

- a) 自标校有效性判定：当自标校后指向误差小于自标校前误差时，判定自标校有效；
- b) 指向精度改善判定：自标校后应满足：指向误差明显减小；
- c) 自标校后精度判定：自标校后指向误差应满足系统指标要求：方位指向误差 $\leq$ 指标值；俯仰指向误差 $\leq$ 指标值；
- d) 多靶标一致性判定：各靶标自标校后误差应均满足要求，不得存在个别点误差过大；
- e) 重复性判定：重复执行自标校后，指向精度结果应一致；
- f) 最终判定：满足以下条件判定试验合格：
 - 1) 自标校后指向误差减小；

- 2) 自标校后满足系统指标，小于 2" ；
- 3) 多靶标均满足要求；
- 4) 重复测试结果一致。

5.4 通信性能测试

5.4.1 入瞳通信接收灵敏度

5.4.1.1 测试配置

测试连接框图如图21所示。

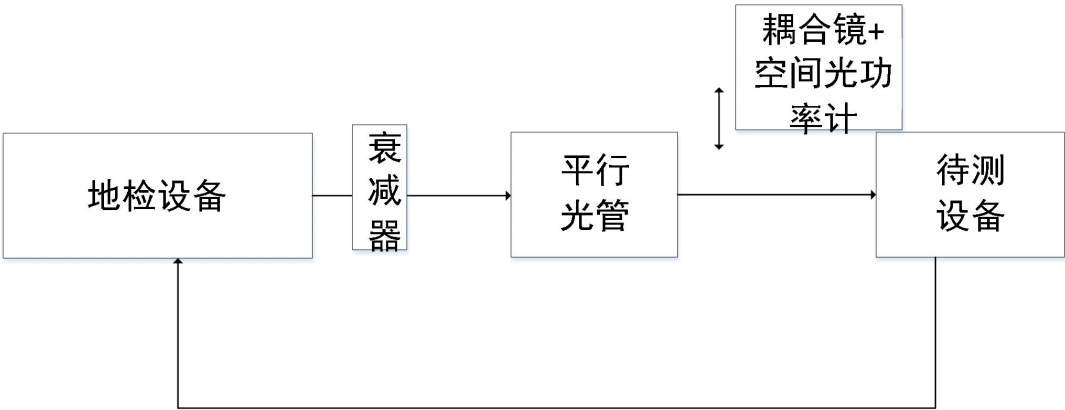


图 21 入瞳通信接收灵敏度配置

5.4.1.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 21 所示连接所有测试设备；
- b) 将待测设备稳固安装在测试工装上；
- c) 调整待测设备与平行光管的相对位置，确保平行光管光轴与待测设备光轴重合；
- d) 地检设备发射激光输出端通过平行光管出射后入射到待测设备，待测设备输出信号连接地检设备输入端。
- e) 调节衰减器衰减量，使得地检设备测量出的误码率达到指定误码率。
- f) 使用和待测设备入瞳直径相等的耦合透镜，耦合透镜透过率为 t ，在待测设备入瞳正前方测量放置耦合透镜，在耦合透镜焦点位置使用空间光功率计测量耦合功率 p 。
- g) 则待测设备入瞳通信灵敏度为 p/t 。

5.4.1.3 注意事项

确保平行光管的波前特性与实际远场一致，避免“近场效应”引入测试误差。

5.4.2 通信调制体制

5.4.2.1 测试配置

测试连接框图如图22所示。

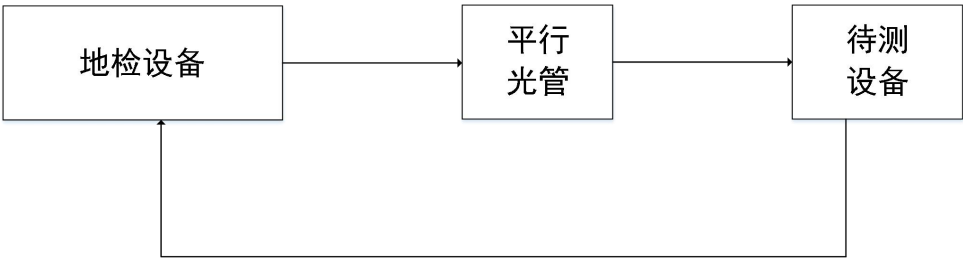


图 22 通信调制体制配置

5.4.2.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 22 所示连接所有测试设备；
- b) 将待测设备稳固安装在测试工装上；
- c) 调整待测设备与平行光管的相对位置，确保平行光管光轴与待测设备光轴重合；
- d) 地检设备发射激光输出端通过平行光管出射后入射到待测设备，待测设备输出信号连接地检设备输入端。
- e) 地检设备设定不同的通信调制格式，通过地检设备测量出的误码率。
- f) 若地检设备能够解调并达到指定误码率，则待测设备具备此种通信调制格式。

5.4.2.3 注意事项

确保平行光管的波前特性与实际远场一致，避免“近场效应”引入测试误差。

5.4.3 误码率

5.4.3.1 测试配置

测试连接框图如图23所示。

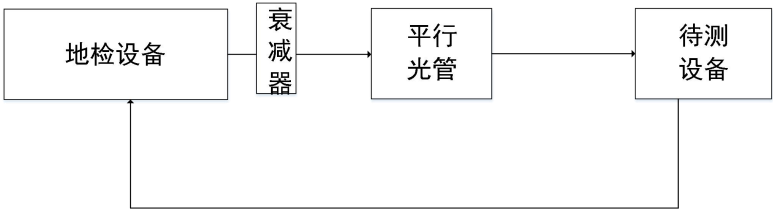


图 23 误码率配置

5.4.3.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 23 所示连接所有测试设备；
- b) 将待测设备稳固安装在测试工装上；
- c) 调整待测设备与平行光管的相对位置，确保平行光管光轴与待测设备光轴重合；
- d) 地检设备发射激光输出端通过平行光管出射后入射到待测设备，待测设备输出信号连接地检设备输入端。
- e) 调节衰减器衰减量，使得地检设备测量出的误码率达到一定误码率。

- f) 使用和待测设备入瞳直径相等的耦合透镜，耦合透镜透过率为 t ，在待测设备入瞳正前方测量放置耦合透镜，在耦合透镜焦点位置使用空间光功率计测量耦合功率 p 。
- g) 则不同入射功率 p/t 下的误码率即为设备的误码率性能。

5.4.3.3 注意事项

确保平行光管的波前特性与实际远场一致，避免“近场效应”引入测试误差。

5.4.4 编码方式

5.4.4.1 测试配置

测试连接框图如图24所示。

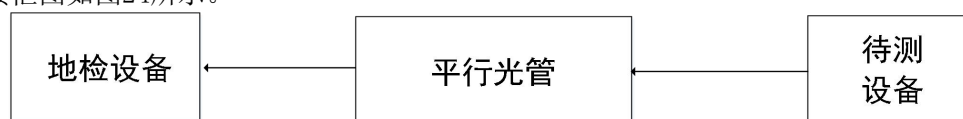


图 24 编码方式配置

5.4.4.2 操作步骤

操作步骤如下：

- a) 依据图 24 所示连接所有测试设备；
- b) 将待测设备稳固安装在测试工装上；
- c) 调整待测设备与平行光管的相对位置，确保平行光管光轴与待测设备光轴重合；
- d) 待测设备发射激光对准平行光管，平行光管光纤输出端接地检设备。
- e) 地检设备解调出信号码型，对比原始码型，判断编码方式。

5.4.4.3 注意事项

确保平行光管的波前特性与实际远场一致，避免“近场效应”引入测试误差。

5.5 环境适应性测试

5.5.1 温度和湿度

设备在总体要求温度和湿度条件下进行设备指标测试，观察设备功能性能是否发生变化，遵循GJB 150A、QJ 3117、GJB 2438B的试验要求。

5.5.2 热循环

设备在总体要求的热循环条件下进行试验，试验完成后测试设备功能性能是否发生变化，遵循GJB 150.4A、QJ 3117的试验要求。

5.5.3 老炼

设备在总体要求的老炼条件下进行试验，试验完成后测试设备功能性能是否发生变化，遵循QJ 908B、GJB 1032A的试验要求。

5.5.4 空间辐射适应性

设备在总体要求的空间辐照条件下进行试验，试验完成后测试设备功能性能是否发生变化，遵循GJB 2547、GB/T 46132、GB/T 46189、QJ 20000的试验要求。

5.5.5 热真空适应性

设备在总体要求的热真空条件下进行试验，试验过程中测试设备功能性能是否发生变化，遵循GJB 150.7A、QJ 3117的试验要求。

5.5.6 力学环境适应性

使用振动试验台和冲击试验设备，按照相关标准对终端进行振动和冲击试验，试验后对终端进行外观检查和性能测试。

5.6 安全测试

5.6.1 电气安全

遵循GJB 150、GJB 151B、QJ 3117的试验要求。

5.6.2 激光安全

符合GB/T 7247.1的激光辐射等级要求。

5.6.3 寿命

遵循GJB 150A、QJ 20712、GB/T 42863的试验要求。

5.6.4 平均无故障时间

遵循GJB 899A、QJ 20712、GB/T 5080的试验要求。

6 检验规则

6.1 检验分类

分为质量一致性检验和定型检验。

表 1 检验项目

检验项目	技术要求	试验方法	定型检验	质量一致性检验	
				逐批检验	周期检验
光学性能	4.1	5.1	○	△	○
机械性能	4.2	5.2	○	--	○
捕获跟踪	4.3	5.3	○	△	○
通信性能	4.4	5.4	○	△	○
环境适应性	4.5	5.5	○	--	○
安全要求	4.6	5.6	○	--	○
注：“○”表示需要进行检验的项目，“△”表示根据具体情况选择确定的项目，“--”表示不需要进行检验的项目。					

6.2 定型检验

- 6.2.1 通信终端光学系统在定型时应通过定型检验。
- 6.2.2 定型检验由光学系统制造单位指定质量检验单位负责进行。
- 6.2.3 定型检验中的可靠性鉴定试验的样品数根据光学系统批量、试验时间和成本确定，其余检验项目的样品数量为 2 台。
- 6.2.4 试验中出现故障或某项不通过时，应停止试验。查明故障原因，提出故障分析报告，重新进行该项试验。若在以后的试验中再次出现故障或某项不通过时，在查明故障原因，排除故障，提出故障分析报告后，应重新定型检验。

6.3 逐批检验

- 6.3.1 批量生产或连续生产的系统，进行全数逐批检验，检验中出现任一项不合格时，返修后重新进行检验，若再次出现任一项不合格时，该系统被判为不合格产品。检验项目全部合格后，填写检验记录并发给产品合格证。
- 6.3.2 逐批检验由系统制造单位质量检验部门负责进行，必要时订货方可提出参加。

6.4 周期检验

6.4.1 连续生产的光学系统，每两年至少进行一次周期检验。

6.4.2 周期检验由光学系统制造单位质量检验部门或指定质量检验单位进行。根据订货方的要求，制造单位应提供该产品近期的周期检验报告。

6.4.3 周期检验样品应在逐批检验合格产品中随机抽取，其中的可靠性验收项目的样品数根据光学系统批量、试验时间和成本确定，其余检验项目的试验样品数为2台。

6.4.4 检验中的出现故障或任一项通不过时应查明故障原因，提出故障分析报告。经修复后重新进行该项检验。之后，再顺序做以下各项周期检验。如再次出现故障或某项通不过，在查明故障原因，提出故障分析报告，再经修复后，则应重新进行各项周期检验。在重新进行检验中又出现某一项通不过的情况时，则判该产品通不过周期检验。经周期检验中的环境试验的样品，应印有标记，一般不应作为正品出厂。

6.4.5 检验后要提交周期检验报告。

7 标志、包装、运输和贮存

7.1 标志

产品包装应有如下标志：

- a) 产品名称；
- b) 生产厂名及厂址；
- c) 生产日期或批号；
- d) 检验合格标志；
- e) 包装量；
- f) 质保期；
- g) 防水防潮标志。

7.2 包装

产品包装标志应符合GB/T 191的规定，宜使用带把手或框架的一体化包装方式，并设有温湿度监测和干燥等功能，设置向上、易碎、精密设备等警示标识。

7.3 运输

产品在运输过程中，应做好防水措施，运输过程中应轻装轻卸。

7.4 贮存

产品应放置于洁净厂房的干燥柜中。
