

## 星地激光通信链路地面集成测试系统的构建

李卫森, 鄢双阳

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 郑州 450047)

摘要: 针对星地激光通信链路的地面集成测试需求, 提出了一种地面集成测试装置的构建方案, 该方案可有效解决真实通信终端在地面环境下的相互捕获、跟踪、瞄准及通信等功能验证问题。

关键词: 星地链路; 远场激光; 激光通信; 地面测试平台

中图分类号: TN 248 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2013)01-053-03

## Real-time dynamic integration testing system of satellite-ground laser communication links on the ground

LI Wei-sen, WU Shuang-yang

(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: For the demand of real-time dynamic integration system test, we find a solution based on the ground, which could simulate the function of acquisition, pointing, tracking and communication, based on the ground testing bed, we could validate the system design indicator of communication terminal.

Key words: satellite-ground links; far-field laser; laser communication; ground test bed

## 0 引言

星地激光通信系统由于通信距离远、激光发散角小和跟瞄精度高等特点, 尤其是卫星终端后期的测试、维护困难等因素, 在系统交付使用前, 需完成一整套指标体系的地面集成测试, 以验证激光通信终端的捕获时间、跟瞄精度、通信速率等技术指标和链路设计的正确性, 确保通信终端可靠、稳定地工作。目前欧洲的 SILEX 计划和日本的 LUCE 项目均有建立了相应的地面集成测试平台作为支撑<sup>[1-3]</sup>。为了发展我国的远距离的星地激光通信事业, 必须要建立一整完整的地面集成测试系统<sup>[4]</sup>。

## 1 近场激光光束模拟远场传输

构建地面测试平台, 首先需要从理论上说明如何在实验室或地面环境下模拟和仿真上万千米的远场激光传输分布。

如图 1 所示, 远场条件下在自由空间中, 观察屏上  $P'$  点很远, 可认为是  $A$  面上各点同一  $\theta$  角方向发出的光振动叠加。若在孔后方紧贴放置聚焦透镜, 则对应  $\theta$  角方向的光波将通过透镜会聚于焦面上的一点

收稿日期: 2012-10-10。

作者简介: 李卫森(1979-), 男, 工程师, 主要从事无线光通信系统、光学系统设计方面的工作。

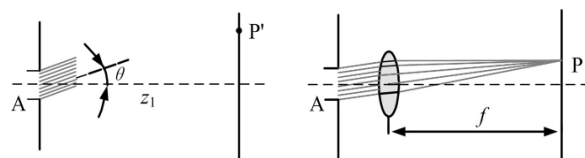


图 1 弗朗和费衍射原理图

$P$ 。在焦面上观察到的衍射图样同远场观察到的衍射图样相似, 比例缩小了  $f/z_1$  倍<sup>[5]</sup>。

根据夫琅和费衍射定律,  $P'$  处的复振幅表达式为:

$$\tilde{E}(x,y) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left[ik\left(z_1 + \frac{x^2+y^2}{2z_1}\right)\right] \iint_A \tilde{E}(x_1,y_1) \times \exp\left[-\frac{ik}{z_1}(xx_1 - yy_1)\right] dx_1 dy_1 \quad (1)$$

如果出射光束通过一个透镜(平行光管等)进行变换, 根据菲涅尔衍射定律, 在透镜后焦面的光分布函数复振幅表达式为:

$$\tilde{E}(x,y)' = \frac{C}{f} \exp\left[ik\left(f + \frac{x^2+y^2}{2f}\right)\right] \iint_A \tilde{E}(x_1,y_1) \times \exp\left[-i\frac{k}{f}(xx_1 - yy_1)\right] dx dy \quad (2)$$

以上两种函数表达式形式完全一致, 故在实验室环境下, 通过聚焦透镜可近距离模拟激光远场的弗朗和费衍射。

李卫森, 邬双阳; 星地激光通信链路地面集成测试系统的构建

搭建激光远场衍射模拟装置如图 2 所示, 激光由置于焦面位置的单模光纤导出, 经透镜变换后平行射出, 再经 CCD 摄像镜头接收成像。由图像处理得到聚焦光斑的第一、二、三级暗纹直径, 与理论衍射参数比较接近, 可视为满足远场夫琅和费衍射要求。因此, 在平行光管焦面上放置单模导光光纤(芯径约  $9\mu\text{m}$ ), 发射光场可满足远场衍射要求<sup>[6]</sup>。

通过给光纤的光输出端加载驱动源, 使其在光纤焦平面内平动, 可实现激光在一定角空间的动态扫描, 并模拟发射光束的空间实时指向。

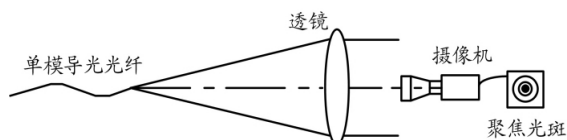


图 2 激光远场光斑模拟装置

## 2 地面集成测试系统的构建框架

### 2.1 激光指向仿真系统的工作原理

根据夫琅和费远场衍射的理论推导, 两个待测通信终端直接瞄准测试存在一定的问题。基于实验室环境下, 拟通过远场光束指向模拟透镜进行系统仿真验证, 系统构建如图 3 所示。

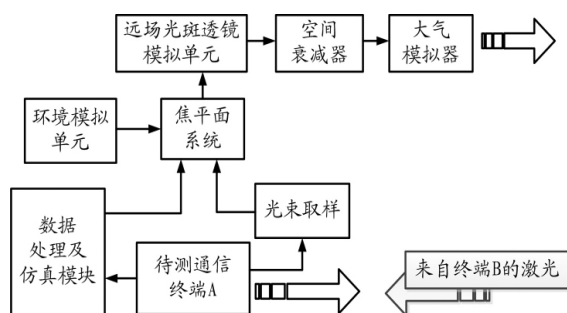


图 3 地面集成测试仿真单元组成模块

待测通信终端 A 接收 B 端的光信号, 自动捕获跟踪系统实时提取脱靶量位置信息, 焦平面系统的驱动器接收数据处理模块的位置数据, 带动光源在焦平面内振动, 通过模拟透镜实现激光光束的空间扫描。焦平面系统为光束指向仿真模块的关键, 原理组成如图 4 所示。

在图 4 中, 驱动器 1、2 分别对应捕获(含粗跟踪)和精跟踪位移通道, 其各自位移同模拟透镜的焦距以及粗、精跟踪视场有关系。位移传感器 1、2 实时反馈光纤端面的位置信息。工作平台模拟器分别代表通信终端不同的安装固定平台(如卫星平台、地基平台等), 将其振动功率谱通过驱动器 3 输入焦平面系统。

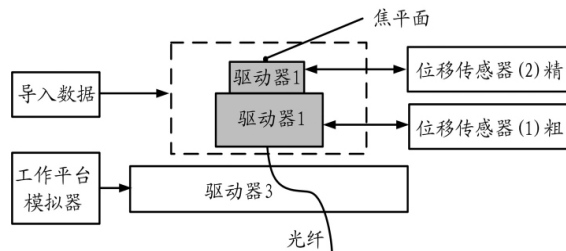


图 4 焦平面系统的组成框图

已知捕获(含粗跟踪)视场为  $\alpha_C$ , 精跟踪视场为  $\alpha_F$ , 模拟透镜焦距为  $f$ , 要求驱动器 1、2 的最大行程不小于  $L_C$  和  $L_F$ :

$$\begin{cases} L_C \approx f\alpha_C \\ L_F \approx f\alpha_F \end{cases} \quad (3)$$

设粗、精跟踪精度分别为  $\delta_C$ 、 $\delta_F$ , 驱动器 1、2 的位移分辨率不大于  $l_C$ 、 $l_F$ :

$$\begin{cases} l_C \approx f\delta_C \\ l_F \approx f\delta_F \end{cases} \quad (4)$$

设定终端 A 的捕获(含粗跟踪)、精跟踪视场空间分别以矩阵  $M$ 、 $N$  来表达, 通过数据变换投影到模拟透镜焦平面上坐标值等效电压矩阵  $U$ 、 $V$ , 变换系统通过标定给出变换系数  $K$ :

$$\begin{cases} U=KM \\ V=KN \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2 光束指向仿真模块的详细设计

光束指向仿真系统组成模块包括: 光学模拟透镜单元、光学取样耦合、光隔离器、焦平面系统、待测通信终端、数据处理单元、平台扰动模拟器以及二维阵列镜系统, 其工作示意图如图 5 所示。大气模拟器和平台扰动模拟器用于环境参数的仿真, 二维阵列镜系统用于捕获状态下光束与通信终端的光束一致。

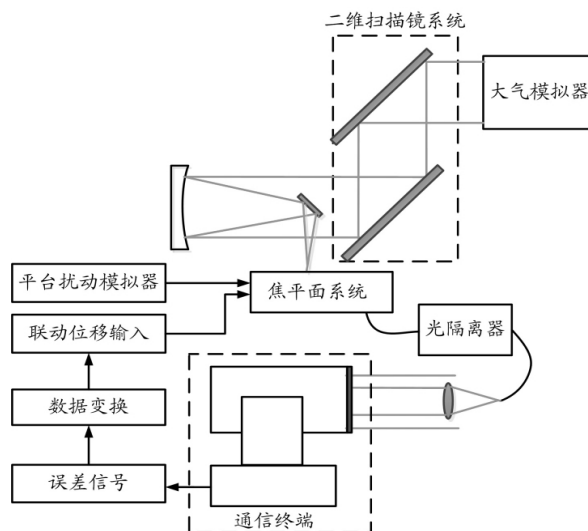


图 5 激光指向仿真控制系统

终端 A 的激光出射信号经光学取样耦合单元进入单模光纤, 并经过光隔离器件精确定位于模拟透镜的焦面上, 可作为模拟光源。终端 A 接收对方的激光信号, 并由粗、精跟踪单元给出各自的脱靶量。经由数据变换式(5), 加载在焦平面系统中的二维阵镜系统和驱动器上, 用以实时仿真通信终端的捕获、跟踪和瞄准的全工作链路。

全系统链路的构建基于图 5 的设计基础之上, 如图 6 所示。可以用于测试系统的捕获概率、捕获时间、动态 ATP 的精度和带宽、通信速率等指标参数。

### 2.3 仿真测试模块的工作流程

①捕获。如图 6 所示, 在测试过程中, 通信终端 A、B 在各自 FOU 区域内扫描, 以便能捕获到对方信标光。二维扫描阵镜系统根据通信终端的角度控制数据实现了二维振动, 实现光束在 FOU 内的等效快速扫描, 直到通信终端捕获到经变换透镜透射过来的信标光, 完成捕获。

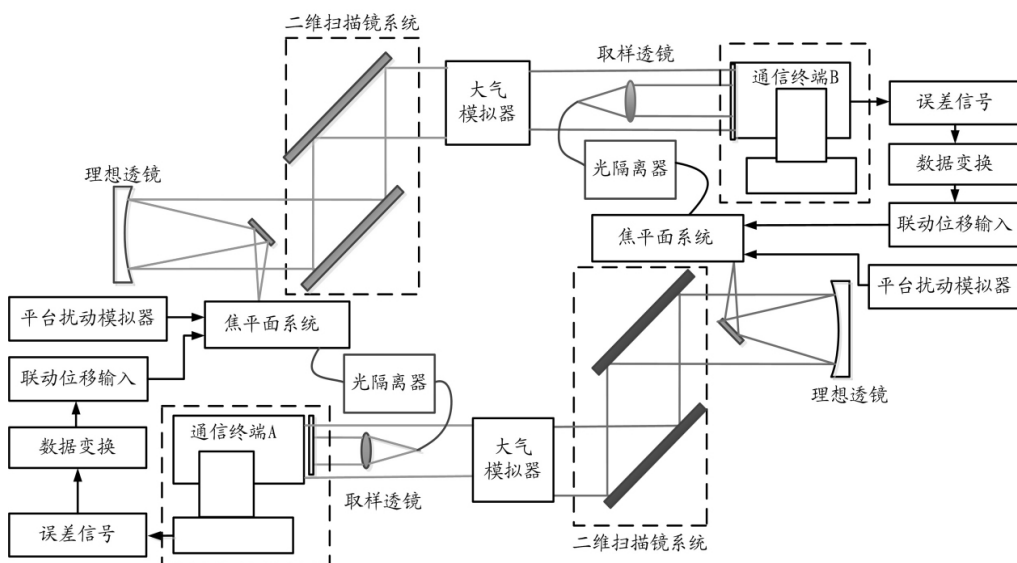


图 6 系统仿真测试平台

②跟踪。通信终端捕获到对方的信标光, 粗跟踪探测通道提取脱靶量 ( $A_0, E_0$ ), 并调转伺服平台对准信标光来向, 模拟透镜单元依据脱靶量值, 同步调整光束指向, 直至双方建立稳定的跟双向跟踪。经过双方粗跟踪转台伺服系统的控制, 将双方信标光引导至粗精跟踪转换门限。模拟透镜的焦平面驱动器 1 上电, 闭环模拟粗跟踪的光束指向。驱动器 1 的特点是行程大、频率低、精度要求不高及可用步进电机进行控制等。

③瞄准。在通信终端跟踪至粗精跟踪转换门限时, 切换至精跟踪, 在集成测试平台上实现, 由通信终端的 FSM 系统实现精跟踪的相互瞄准过程。在精跟踪状态的光束指向靠驱动器 2 的精密位移调整来实现激光光束的微小抖动。驱动器 2 的特点是行程小、速度快、位移精度高以及可用压电晶体器件做驱动源。

④通信。在通信两端建立稳定精跟踪后, 开启激光通信系统, 模拟星地链路的上下行一定通信速率的试验过程。

### 3 结束语

系统集成测试平台构建的前提是基于弗朗和费远场衍射理论, 我们从理论上说明了在实验室距离有限的环境下模拟远场激光的可行性, 并创新性地提出了建立地面集成测试系统的原理组成框架。地面集成测试的关键是通过模拟透镜来仿真通信终端的发射光束指向, 并将平台抖动、大气湍流、空间衰减等因素

通过仿真器引入通信链路两端, 最终在实验室环境下真实模拟全过程动态激光通信的过程。这对星地等远距离无线激光通信系统具有重要的参考价值, 并对建设我国地面集成测试平台具有一定的参考和借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] JONOT, TAKAYAMA Y. OICETS on-orbit laser communication experiments[J]. Proc. of SPIE, 2006, 6105: 3
- [2] TOLKER N, OPPENHAEUSER G. Inorbit test of an operational inter-satellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. Proc. of SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [3] NAKGAWA K, YAMAMOTO A. Performance test result of LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment) engineering model[J]. Proc. of SPIE, 2000, 3932: 68-76.
- [4] 刘立人. 卫星激光通信 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 147-155.
- [5] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 王建民, 秦谊, 徐泉, 等. 卫星激光通信端机跟瞄精度测试技术研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(8): 1054-1059.