

# 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 星间激光通信终端的主要技术指标和运行性能必须事先在地面实验室条件下进行模拟检验, 因此在研制卫星激光通信终端的同时必须发展相应的系统性检测和验证平台, 主要包括激光通信性能检验、光跟瞄性能检验和光束质量检验。本文综述了卫星激光通信终端检验技术的国外进展, 介绍了我们全物理模拟的地面检测验证思路和方法。

**关键词** 光通信; 卫星激光通信; 光跟瞄检验平台; 光通信性能检验平台; 波面分析

**中图分类号** TN 929.1 **文献标识码** A

## Laser Communications in Space II Test and Verification Techniques on the Ground

LIU Li-ren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The technical specifications and the functions of a satellite lasercom terminal must be tested and verified before its launch. Thus it is necessary to build up the testbeds at the same time to develop terminals, which include the communication performance testbed, the pointing, acquisition, tracking (PAT) function testbed and the setup for testing the quality of beam wavefront. This paper reviews the international progresses on the test and verification of lasercom terminals, and presents our proposals of testbeds with fully physical simulations.

**Key words** optical communication; laser communications with satellites; optical pointing, acquisition, tracking function testbed; lasercom performance testbed; wavefront analysis

### 1 引 言<sup>[1~6]</sup>

一个卫星激光通信终端通常由两大基本系统组成, 即激光通信系统和光学跟瞄系统, 前者用于两个卫星的信息传输, 后者用于它们之间的瞄准、捕获和跟踪。但是, 星间激光通信终端的主要技术指标和运行性能不可能在空间进行检测和验证, 必须事先在地面实验室条件下进行模拟检验, 因此必须在发展终端的同时或者预先建立相应的实验室地面检测验证平台。目前已获成功的星间激光通信计划, 如 SILEX 等, 都充分证明了为发展高精度高性能激光通信终端必须建立更高精度的地面检验平台的必要性。

文献[1]介绍了高码率、小型化、轻量化和低能耗的自由空间激光通信终端。本文将介绍和总结卫星激光通信终端地面检测验证技术的国际发展现状, 讨论其关键技术, 并介绍我们的全物理模拟检验的设计思想。卫星激光通信终端的系统性检验项目主要包括: 1) 远距离自由空间激光通信性能的检测验证, 即在一定的模拟距离上的通信误码率的检测; 2) 光学瞄准、捕获、跟踪性能的检测验证, 即 PAT (Pointing, Acquisition, Tracking) 检验, 包括向对方终端瞄准, 扫描捕获信标激光, 从捕获转入跟踪, 最终进行大范围精密跟踪, 并包括抗卫星振动等的全过程检验。此外, 也包括若干最重要的终端技术参数的测量, 如通信激光光束的发散度或波面波差。

收稿日期: 2006-11-10; 收到修改稿日期: 2006-11-17

作者简介: 刘立人(1942—), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为光折变光学、晶体光学和星际激光通信。  
E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

## 2 地面检测和验证技术的国外进展

星间激光通信终端属于高精度的光机电系统，其代表性技术指标为：通信激光光束达到衍射极限，其发散度为微弧度量级，跟瞄精度达到亚角秒量级，通信距离至数万千米，因此激光通信终端的检测验证需要很高精度的测量手段。

因此，世界各国的空间激光通信终端发展项目无不同时或者预先发展空间激光通信的地面检测和验证设备，用于检测空间激光通信终端整机的主要技术指标、验证远距离激光通信性能和光学捕获跟瞄动态性能。对于终端整机的检验，国外采用半物理模拟半计算机仿真的手段。

### 2.1 欧空局 SILEX 计划的地面检验平台<sup>[2~8]</sup>

欧空局 SILEX 计划的地面光学终端测试包括关键单元器件及各功能子系统的性能测试和评价、系统总体性能的测试和评价、系统动态跟瞄性能的测试和评价等。系统检验是采用半物理半计算机模拟方法进行的。SILEX 计划有两种用于空间激光通信终端的系统性测试平台，即地面支撑测试设备 TTOGSE(Terminal Test Optical Ground Support Equipment)和系统测试平台 STB(System Test Bed)。

地面支撑测试设备 TTOGSE(图 1)用于空间热环境模拟下的激光通信终端整机或者它的光学头的光学和静态瞄准性能，它的组成为(图 2)：1) 用作检验的光学接收系统，包括：平行光管、偏振仪、干涉仪、集成球面、光谱仪以及波前差和静态瞄准分析软件包；2) 用作检验的光学发射系统，包括：准直光束、可运动平行光管。

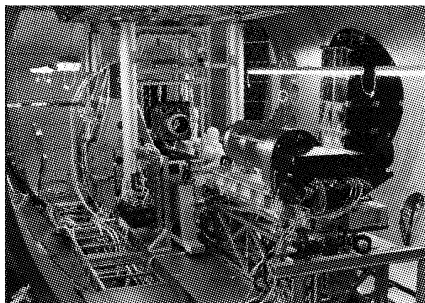


图 1 欧空局瑞士 Liège 空间中心的 SILEX 终端检验平台  
Fig. 1 SILEX specimen and TTOGSE bench in ESA LIEGE space center

地面支撑测试设备 TTOGSE 的性能技术指标为：1) 测量范围： $\pm 5000 \mu\text{rad}$ ；2) 光谱精度： $0.05 \text{ nm}$ ；3) 远场光斑测量：光度学精度： $10\%$ (绝对)， $5\%$ (相对)；瞄准误差测量精度： $0.2 \mu\text{rad}$

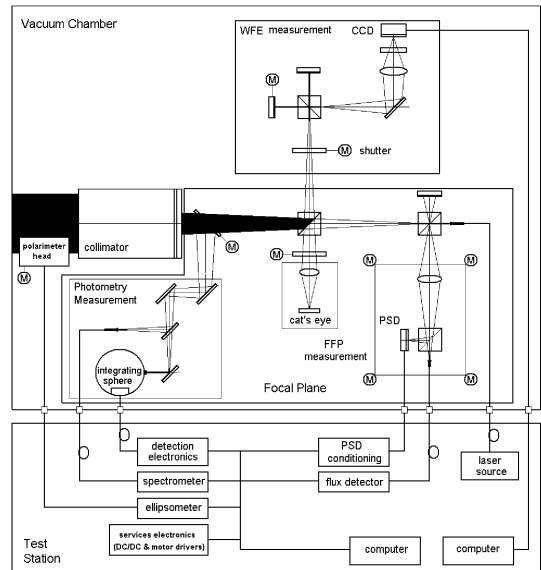


图 2 TTOGSE 光学结构图

Fig. 2 Functional block diagram of TTOGSE bench

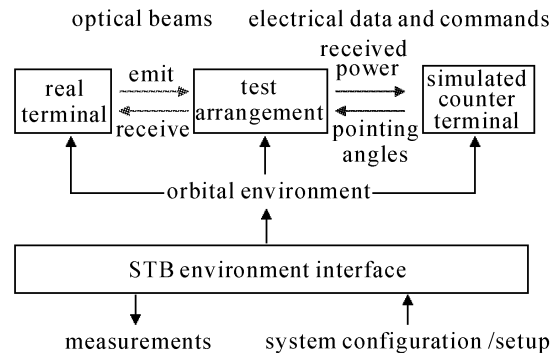


图 3 系统测试平台 STB 的组成图

Fig. 3 Configuration of STB

( $100 \mu\text{rad}$ 内)；4) 退偏振对比度精度： $10^{-3}$ ；5) 波前误差测量精度： $\lambda/30$ (绝对)， $\lambda/50$ (相对)；6) 离焦精度： $\pm 1 \mu\text{m}$ (绝对)， $\pm 0.5 \mu\text{m}$ (相对)。

图 3 是系统测试平台 STB 的结构方框图，采用实验平台组装方式进行终端的光学头的动力学性能检测，包括(图 4)：1) PAT 系统测试与验证，即动态测量发射光束和接收光束之间瞄准误差检验，捕获概率测量，PAT 抑制曲线(无 PAT 控制和有 PAT 控制两种情况下，瞄准误差的比较曲线)；2) 系统测试与验证，包括通信性能测试、光学连接可靠性测试。

系统测试平台 STB 的技术指标为：1) 光度学测量： $10\%$ (绝对)， $5\%$ (相对)；2) 作为检验用的发射器的性能：频率  $500 \text{ Hz}$  以上；范围  $\pm 120 \mu\text{rad}$ (即外角  $4 \mu\text{rad}$ )；精度  $\pm 10 \mu\text{rad}$ (即外角  $0.3 \mu\text{rad}$ )；3) 作为检验用的接收机的性能：角测量精度： $5 \mu\text{rad}$ (即外角  $0.15 \mu\text{rad}$ )；观察速率： $1 \text{ kHz}$  以上。

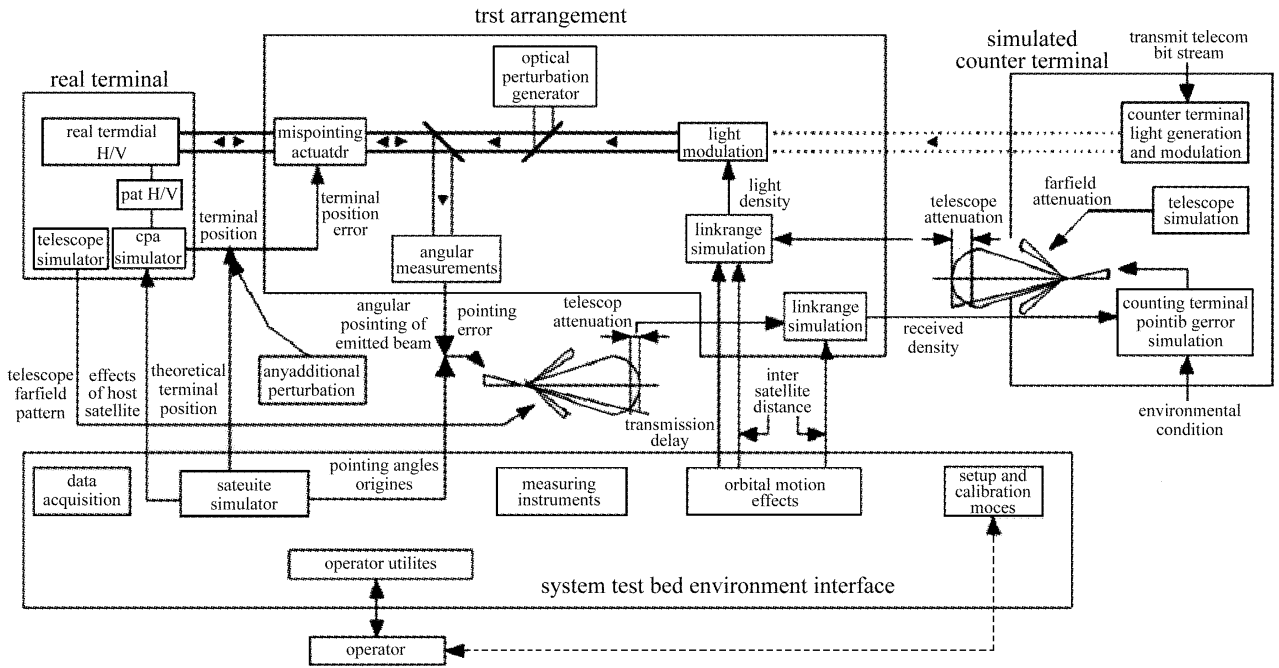


图 4 系统测试平台 STB 的光路结构图  
 Fig. 4 Functional block diagram of STB

2.2 其他地面检验平台

日本也开发了自己的星间激光通信实验室验证系统 (GOAL: Ground Optical Assistance for LUCE)<sup>[9~13]</sup>, 如图 5 所示。GOAL 的视场比较有限, 不能够用来测试捕获时间, 需要使用另外一个设备, 即目标终端模拟器 (Target Terminal Simulator), 该设备被放置在绝热的模拟空间环境中。

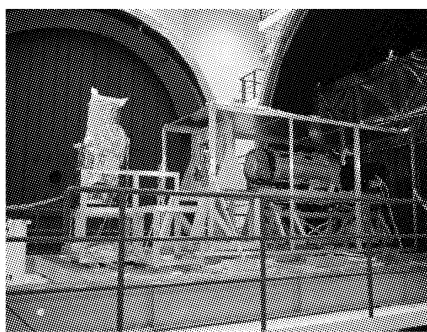


图 5 日本 LUCE 终端的 6 m 空间仓内的 GOAL 光学测试系统  
 Fig. 5 GOAL testbed and LUCE lasercom terminal in a 6m space chamber

瑞士 Contraves 空间中心也发展了激光通信终端检验平台<sup>[14~16]</sup>, 其平行光管具有很大的口径, 图 6 是其检验激光通信终端 OPTEL25 和 OPTEL80 时的工作状态。

美国 JPL 开发了激光测试和评估平台<sup>[17~20]</sup>,

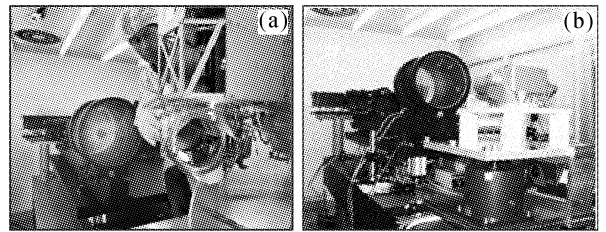


图 6 瑞士 Contraves 光学检验平台测量 OPTEL25(a) 和 OPTEL80(b)  
 Fig. 6 Testbed for OPTEL25 (a) and OPTEL80 (b) in contraves space center

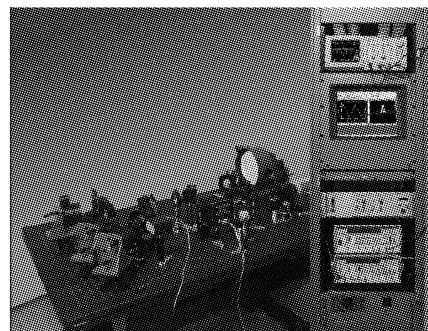


图 7 美国 LTES 光学检验装置  
 Fig. 7 LTES in JPL

即 LTES(Lasercom Test and Evaluation Station), 见图 7 和图 8, 为 ATC 发展的 STRV-2/LCT 终端和 JPL 研制的 OCD 终端进行了测试和分析。因为被测量的终端的光学口径比较小, 跟瞄装置比较简单, 因此 LTES 平台结构比较简单, 属于实验室平台装置。

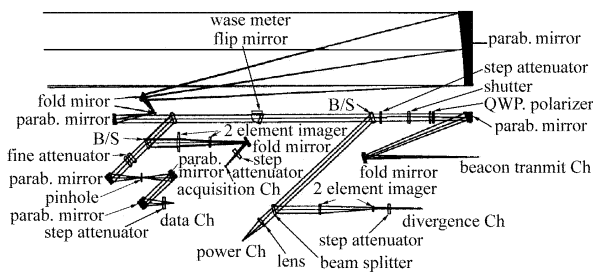


图 8 美国 LTES 的光路图  
Fig. 8 Optical paths of LTES

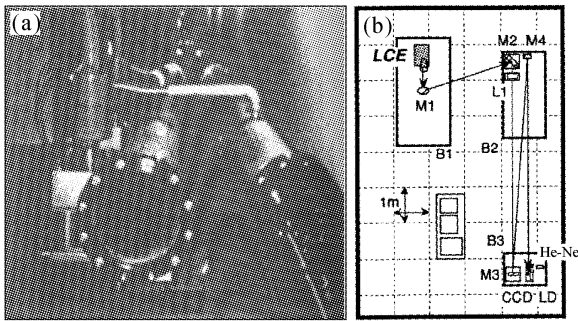


图 9 日本自由空间激光传输模拟器(a)及其结构布置图(b)

Fig. 9 Free-space simulator for laser transmission in CRL (a) and its geometric arrangement (b)

从检验平台的技术含量也可以看出欧洲的卫星激光通信技术的发展水平很高。

日本自由空间激光传输模拟器(图 9)由日本 ART 光通信和射频通信研究室发展,它通过精密测量光束的远场图样来评估光束控制系统的精度和性能<sup>[21,22]</sup>。此传输模拟器实质上是一个带有 CCD 的大口径长焦距平行光管,口径 260 mm,焦距长 17.5 m,角分辨率 0.75  $\mu$ rad。采用距离的比例压缩原理,可模拟距离为 50km 的激光传输。为防止地面大气气流和环境震动的影响,设计了一个防大气抖动舱,内部抽真空可保持压强为 1.33 Pa。后来成功实现了世界首次星地激光通信的星载终端(LCE)的远场光斑图样测量,为更准确地评估 LCE 终端的下行链路预算和发射天线性能提供了实验依据,并进一步验证了该模拟器的有效性。

### 3 全物理模拟地面检测和验证技术

国际上报道的卫星激光通信终端地面检验平台采用了半物理模拟半计算机仿真检验方案,我们建议采用全物理模拟的检验方案:采用激光平行光管模拟对方激光通信终端,采用光束扫描器偏转光束模拟卫星在空间的相对运动轨迹,采用比例化等效超长焦距的光学傅里叶变换模拟光束远场传播,即

在全物理模拟环境下进行被测终端的检验,因此可以获得更准确的评估<sup>[23]</sup>。

#### 3.1 卫星激光通信光跟瞄检测验证平台

在空间从发射激光通信终端到接收激光通信终端的距离为数百千米到数万千米,光学上属于远场衍射。而在地面实验室模拟中,从检测发射光通信终端到被测卫星激光通信终端的距离只为数米左右,属于光学近场衍射<sup>[24]</sup>。

我们采用菲涅耳衍射理论研究了从发射终端向接收终端激光传播的远场衍射和近场衍射特性,发现远场条件下接收终端的光跟踪位置误差信号是由于两个终端之间的相对平动和接收端的偏转而产生的,这时发射端的偏转不产生误差信号的位置变动而只导致其强度变化,也发现在近场条件下两个终端之间的相对平动不产生位置误差信号的变动,而发射端和接收端的偏转都会产生位置误差信号的变动。可见远场衍射和近场衍射有本质上的差别。但是,在近场检测条件下可以采用激光平行光管和光束扫描器系统的组合进行光束偏转来模拟远场下的光束偏离,进行被测激光通信终端的光跟踪检测验证,但是也必须注意误差信号产生原因的不同。我们证明了近场检验中采用两个卫星之间的相对角度运动轨迹的光束扫描可以准确模拟远场下的卫星相对运动,给出了等效于卫星之间远场运动的近场模拟光束偏转条件的推导。同时发现了如下特点:远场下接收光斑取决于接收光学,而近场下接收光斑与发射光学和接收光学都有关;平行光管发射光束的抖动能够模拟接收终端卫星平台的抖动环境。我们根据这些基本概念发展了相应的光跟瞄检验平台<sup>[23,25]</sup>。

图 10 给出了所发展的光跟瞄检验平台的外形结构,其光学结构见图 11。由卫星轨道模拟扫描装置、精密光束扫描装置和双焦距激光收/发平行光管三部分组成,可用于卫星激光通信终端以及其他激光应用系统的 PAT 技术指标测量和运行性能的验证。

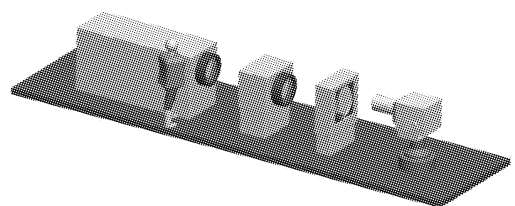


图 10 卫星激光通信光跟瞄检测验证平台外形示意图  
Fig. 10 A suggested PAT test bed with two beam scanners and a double-focus laser collimator

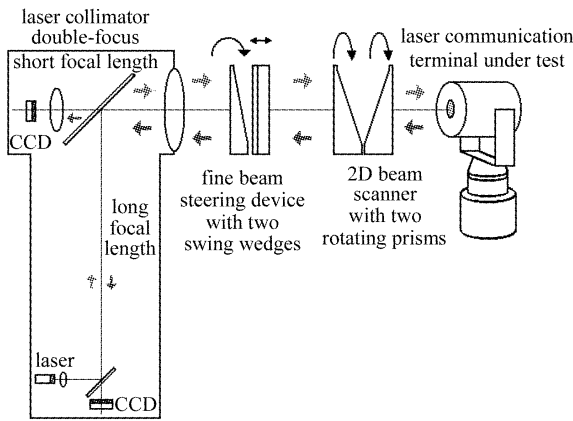


图 11 光跟瞄检测验证平台的光学原理图

Fig. 11 Optical functional diagram of the PAT test bed

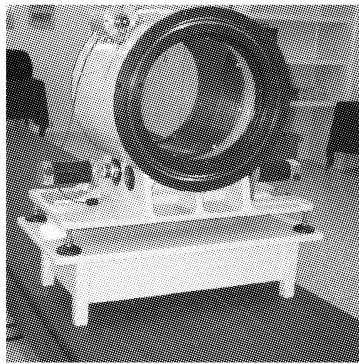


图 12 大范围光束扫描器

Fig. 12 Optical scanner with a big range of 2D angular deflection of beam

卫星轨道模拟扫描装置由旋转双棱镜组成(图 12),用于实现光束二维扫描以模拟卫星相对运动,双棱镜结构可以获得较大范围的角度扫描,也能够

得到很近的被测终端至扫描器的工作距离,减少有限孔径的渐晕效应<sup>[26~28]</sup>。精密光束扫描器采用光楔摆动产生微小光束偏转的原理,由正交光楔组成,产生二维精密光束偏转<sup>[29~32]</sup>。卫星轨道模拟扫描装置和精密光束扫描器相结合可以产生大范围高精度角度扫描。双焦距激光收/发平行光管相当于测试用的激光通信终端,用于发射激光信号也用于接收被测终端发射的激光光束,它有两个焦距,短焦距接收 CCD 具有较大视场和较低测量精度,长焦距接收 CCD 具有较小视场和较高测量精度,可以分别用于 PAT 的瞄准捕获过程和跟踪过程的测量<sup>[33]</sup>。

光跟瞄检验平台的技术指标为:1) 通光孔径:  $\phi 440$  mm; 2) 卫星相互运动轨迹扫描模拟: 俯仰  $\pm 15^\circ$ , 方位  $360^\circ$ ; 3) 光束偏转精度:  $0.5 \mu\text{rad}$ ; 4) 激光发射波长: 800 nm 波段, 可调; 5) 最大接收视场:  $0.4^\circ$  ( $f_1 = 1.5$  m); 6) 最小分辨视场:  $1 \mu\text{rad}$  ( $f_2 = 10$  m); 7) 角测量精度:  $0.1 \sim 1 \mu\text{rad}$ 。

我们发展的光学动态检验平台与 SILEX 的地面支撑测试设备 TTOGSE 的性能比较见表 1。可见 SILEX 检验系统只能在小精度范围内实现光束偏转进行终端的光跟踪性能的物理模拟测量,并结合计算机仿真进行终端的质量评估,其原因是平台设计中完全不能实现卫星相互三维运动轨迹的物理模拟,因而只能作静态跟踪检测。而本系统能够在在大角度范围内进行高精度角度扫描,因此能够实现按照卫星相对运动轨迹运动的终端的瞄准、捕获、跟踪的全过程物理模拟以及静态和动态检测验证。

表 1 光跟瞄检验平台的性能比较

Table 1 Comparison between the SILEX TTOGSR and the testbed designed by us

Testbed	SILEX TTOGSE	PAT testbed of author's laboratory
Configuration	Collimator and attachments	A collimator system, an optical scanner and a fine beam deflection device
Environment	Therm vacuum chamber	Optical lab
Object of test	Lasercom terminal, full aperture	Lasercom terminal, full aperture
Simulation of satellite orbit	No	An optical scanner $\pm 15^\circ$ and $360^\circ/100 \mu\text{rad}$
Fine beam deflection	Motorized collimator $\pm 5$ mrad	Fine beam scanning $1\text{mrad}/0.5 \mu\text{rad}$
Condition for PAT testing	Semi-physical and semi-computing simulation	Full physical simulation
PAT testing	Static-state tracking performance	Static-state and dynamic performance in pointing, acquisition and tracking

### 3.2 远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台

远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台用于卫星激光通信终端发射光束的空间远距离传播光学模拟,并进行激光通信误码率检测<sup>[34~37]</sup>。

工作原理基于距离比例压缩的原理,见图 13。在空间实际条件下一个终端的激光发射光束通过夫琅禾费远场衍射到达对方终端,对方终端用一定的孔径接收(图 13 上部分)。这种传播过程事实上可

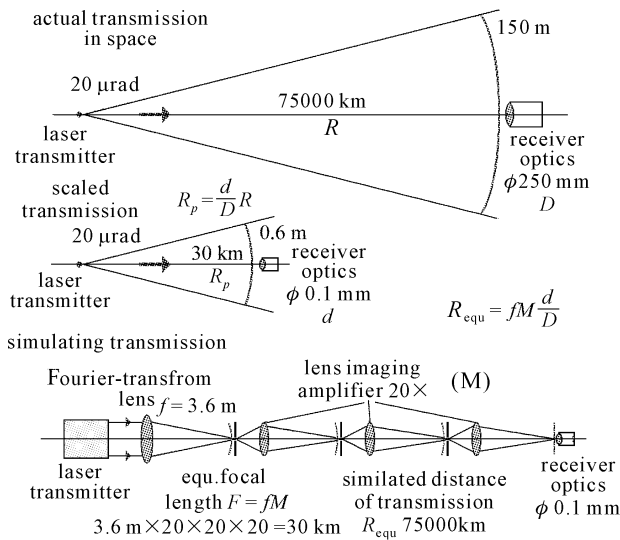


图 13 远距离光束传播波前采样的比例化压缩原理以及光学傅里叶变换模拟

Fig. 13 Simulation of beam propagation by scaled wavefront sampling and realization by an optical Fourier transformer followed by amplifiers

以比例化地进行压缩,即传播距离等效缩小,接收孔径也按比例缩小(图 13 中部分)。然后,缩小了的远场传播可以用光学透镜和级联光学放大器模拟(图 13 下部分),其中光束的夫琅禾费远场变换用透镜的光学傅里叶变换实现,而光学变换透镜和多级光学放大器产生的等效焦距则模拟比例压缩传播距离。

因此,远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台由长焦距傅里叶光学变换透镜、多级光学放

大器、波面采样小孔和精密光束扫描控制器组成。其中精密光束扫描控制器为正交光楔精密光束偏转装置,用于调整输入光束。图 14 为系统光学结构,图 15 为已发展的实物,表 2 给出了装置可能的模拟传播距离。

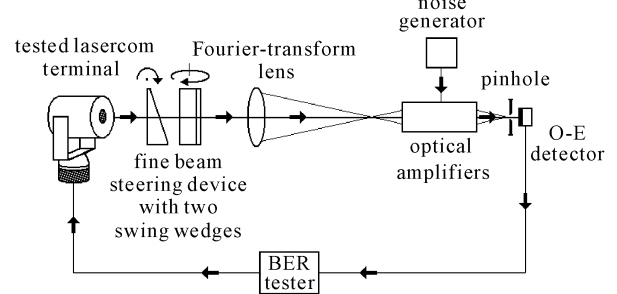


图 14 远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台光学结构

Fig. 14 Functional configuration of suggested far-field beam transmission simulator

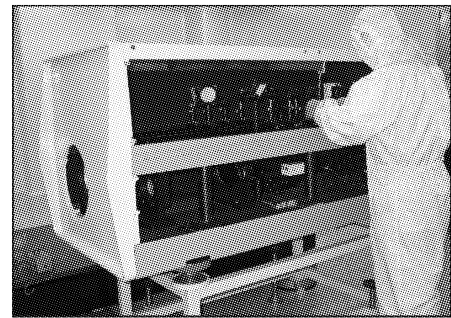


图 15 远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台实物

Fig. 15 Developed far-field beam transmission simulator

表 2 远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台的模拟传播距离  
Table 2 Equivalent transmission distance of the lasercom performance testbed

Evaluation of equivalent distance of transmission (Lasercom aperture $\phi 50 \sim 250$ mm; medium amplifying factor $10\times$ , maximum amplifying factor $20\times$ )		
Wavefront sampling selection	Number of used optical amplifiers	Max distance of equivalent transmission
Multi-mode fiber ( $\phi 100 \mu\text{m}$ )	3 amplifiers	15000~75000 km
	2 amplifiers	750~3750 km
	1 amplifier	37.5~187.5 km
Pinhole ( $\phi 1$ mm)	3 amplifiers	1500~7500 km
	2 amplifiers	75~375 km
	1 amplifier	3.75~18.75 km

远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台的结构设计为:主镜通光孔径: $\phi 280$  mm;主镜焦距:3.6 m;光学成像放大器:三级;成像放大倍数:可变,最大  $20\times$ ,中间  $10\times$ ;最大傅里叶变换等效焦

距:30 km;采样小孔:单模光纤  $\phi 10 \mu\text{m}$ ,多模光纤  $\phi 100 \mu\text{m}$ ,针孔  $\phi 1$  mm;误码率测量范围(min): $10^{-12}$ 。

本装置采用比例化压缩的原理可以实现直至数

万千米的光束远场传播,在测量上具有如下特点:可以固定通信距离,进行可能达到的误码率测量;也可以固定误码率,进行可能达到的通信距离测量。这样便能够对卫星激光通信终端的通信性能质量做出准确的评估,也可以判断发射光束的质量。

本装置采用附加仪器还可以实现光度、偏振、波面、光谱、光斑等的技术参数的检测。

### 3.3 光束波面分析

通信激光光束的发散度是终端最重要的参数之一,但是大口径衍射极限光束的发散度已经不能用平行光管准确测量,必须采用波面分析方法,即首先采用光学方法测量波面波差然后用泽尼克多项式综合出发散度。常用的波面检测手段是采用横向剪切干涉光学平板,但是这种方法的最小可探测波面波高的灵敏度较低,而且不适合于时间非相干激光光源的测量,如空间激光通信常用光谱宽度很大的激光二极管。数字相移剪切干涉仪能够精确测定波面波差,但是造价很高,而且需要极高光学精度的望远镜压缩被测光束口径。Shack-Hartmann 传感器是另外一种可以考虑的基于几何光学原理的波面测量方法,但是用于大口径衍射极限光束波面探测时需要很高精度的传感器和高质量的大口径压缩主镜。

因此我们旨在发展新型的大口径剪切干涉方法以实现大口径波面的直接测量,目的是避免采用附加的大口径望远镜系统并实现等光程干涉,特别是希望在目视测量时能够提高探测波高的灵敏度。为此,本实验室基于雅满(Jamin)干涉和背景条纹偏置原理发展了一种等光程横向双剪切干涉方式的波面分析仪结构。

在所提出的等光程横向双剪切干涉原理的基础上,首先研制了中小口径的实用化波面分析仪,包括单通道双半干涉图演示模式的(原理见图 16)和

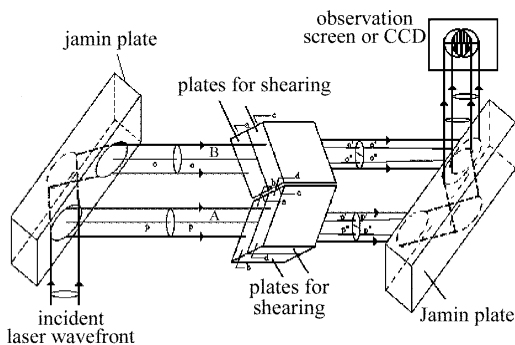


图 16 横向双剪切干涉波面原理

Fig. 16 Configuration of suggested Jamin double-shearing interferometer for diffraction limited wavefront test

双通道双干涉图演示模式的两种结构,优点是可以采用目视观察方法测量衍射极限波面(也可以采用计算机分析),适用于时间相干和非相干光源,抗环境振动且可应用于各种工作条件<sup>[37~40]</sup>。图 17 是单通道双半干涉图模式的白光双剪切干涉波面分析仪的实物,其调整在双剪切应用时视场分为上下两部分,进行相反方向的角度偏转偏置,即在上下视场中产生相同的背景条纹而符号相反。

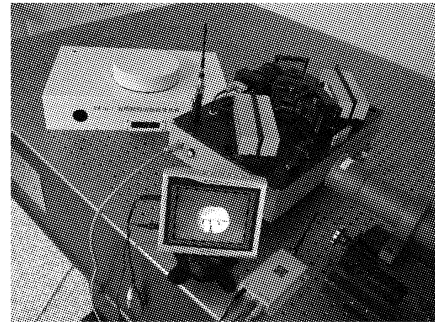


图 17 白光横向双剪切干涉波面分析仪

Fig. 17 Developed interferometric wavefront analyzer

白光双剪切干涉波面分析仪的技术指标为:1) 测量光束口径:10~35 mm;2) 剪切板入射角  $\theta$  改变范围:10°~40°;3) 适用波长:白光;4) 横向干涉方式:单剪切;双剪切,光学楔板楔角 22", 背景条纹宽度~5 mm;5) 最小可测量波高:~0.2 $\lambda$ 。

图 18 给出了接近衍射极限波面的测量结果。图 18(a)为所得到的单剪切干涉条纹图,图 18(b)为双剪切干涉条纹图。当输入波面的波差为 0.23 $\lambda$  时,横向单剪切干涉图出现的条纹远小于一对条纹,因此根本不能进行目视波差测量。而该波面对于双剪切的上下偏置背景条纹将产生符号相反的影响,一半视场中是增加条纹而另一半视场中是减少条纹,从上下干涉条纹数的差可测量出波差,因此能够提高最小可探测波高的探测灵敏度,并实行目视测量。

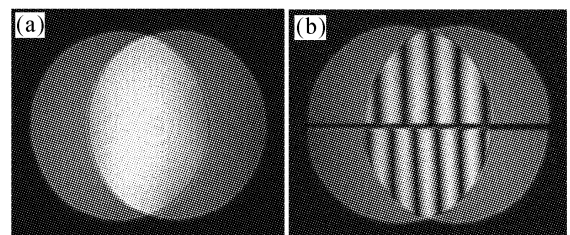


图 18 波高为 ~0.23 $\lambda$  的接近衍射极限的波面的测量

(a) 横向单剪切干涉图;(b) 双剪切干涉图

Fig. 18 Measurement of a wavefront of ~0.23 $\lambda$  wave-height

(a) interferogram of single lateral-shearing;  
(b) interferogram of double lateral-shearing

## 4 结 论

卫星激光通信是信息领域中最新的高科技前沿领域,欧洲已实现了高码率、小型化、轻量化、低功耗的高性能激光通信终端,正在推向工业化应用。星间激光通信终端的主要技术指标和运行性能必须事先在地面实验室条件下进行模拟检验,因此必须同时发展检验平台。欧洲、日本和美国都发展了相应的检验平台。但是在PAT检验方面只能实现静态跟踪测量,从而只能进行半物理半计算机仿真的整体性能检验。而在远距离激光通信性能检验方面,只有日本能够实施30 km的光束初步模拟。

我国应当利用大型光学元件的加工条件发展全物理的检验手段。与激光通信终端研发相比较,地面检测验证平台也是一笔巨大的投资,因为在原理上检验设备必须具有更高的测量精度和更大的光学通光口径,实验室也应当具备模拟空间环境的能力。

本实验室发展了远距离光束传播模拟和通信性能检测验证平台,双剪切干涉波面分析设备,国外尚无报道,具有创新性。所发展的光跟瞄检测验证平台能够进行瞄准、捕获、跟踪全过程的全物理模拟的性能检验,对照国外设备具有明显优点。但是,光通信检验平台和光PAT检验平台必须进一步提高精度,以满足下一代激光通信终端的检验要求,同时也必须进一步改进结构以适合于模拟空间环境实验室的应用。所发展的双剪切干涉波面分析的原理应当发展成为大口径装置。

本文论及了卫星激光通信终端整机的技术指标检测和运行性能的验证,终端的元件级、分系统级的检验也是必要的,所列出的参考文献也有相关内容。

## 参 考 文 献

- Liu Liren. Laser communications in space. 1. Optical link and terminal technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):1~18  
刘立人. 卫星激光通信. 1. 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):1~18
- R. Dumas, B. Laurent. System test bed for demonstration of the optical space communications feasibility [C]. *SPIE*, 1990, **1218**:398~411
- M. Bailly, E. Perez. The pointing, acquisition and tracking system of Silex European program; a major technological step for intersatellites optical communication [C]. *SPIE*, 1991, **1417**:142~157
- F. Cosson, P. Doubrere, E. Perez. Simulation model and on-ground performances validation of the PAT system for Silex program [C]. *SPIE*, 1991, **1417**:262~276
- T.-T. Nielsen. Pointing, acquisition and tracking system for the free space communication system, Silex [C]. *SPIE*, 1995, **2381**:194~205

- G. Oppenhäuser. Silex program status—a major milestone is reached [C]. *SPIE*, 1997, **2990**:2~9
- B. Laurent, G. Planche. Silex overview after flight terminals campaign [C]. *SPIE*, 1997, **2990**:10~22
- G. Planche, B. Laurent, J. C. Guillen *et al.*. Silex final ground testing and in-flight performances assessment [C]. *SPIE*, 1999, **3615**:64~77
- M. Shikatani, M. Toyoda. Ground system development for the ETS-VI/LCE laser communications experiment [C]. *SPIE*, 1993, **1866**:21~29
- K. Araki, Y. Arimoto, M. Shikatani *et al.*. Performance evaluation of laser communication equipment onboard the ETS-VI satellite [C]. *SPIE*, 1996, **2699**:52~59
- K. Nakagawa, A. Yamamoto. Engineering model test of LUCE (Laser Utilizing Communication Equipment) [C]. *SPIE*, 1996, **2699**:114~121
- K. Nakagawa, A. Yamamoto. Performance test result of LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment) engineering model [C]. *SPIE*, 2000, **3932**:68~76
- T. Jono, M. Toyoshima, N. Takahashi *et al.*. Laser tracking test under satellite microvibrational disturbances by OICETS ATP system [C]. *SPIE*, 2002, **4714**:97~104
- G. C. Baister, CH. Haupt, S. Matthews *et al.*. The ISLFE terminal development project—results from the engineering breadboard phase [C]. 2002, AIAA, 2034
- T. Dreischer, A. Maerki, T. Weigel *et al.*. Operating in sub-arc seconds; high precision laser terminals for intersatellite communications [C]. *SPIE*, 2002, **4902**:87~98
- G. C. Baister, T. Dreischer, E. R. Ground *et al.*. The OPTEL terminal development program—enabling technologies for future optical crosslink applications [C]. AIAA, [http://www.constraves.com/popup/popup\\_optel.htm](http://www.constraves.com/popup/popup_optel.htm)
- K. E. Wilson, N. Page, A. Biswas *et al.*. The lasercom test and evaluation station for flight terminal evaluation [C]. *SPIE*, 1997, **2990**:152~157
- A. Biswas, G. Williams, K. E. Wilson *et al.*. Results of the STRV-2 lasercom terminal evaluation tests [C]. *SPIE*, 1998, **3266**:2~13
- M. Jeganathan, S. Monacos. Performance analysis and electronics packaging of the optical communications demonstrator [C]. *SPIE*, 1998, **3266**:33~41
- A. Biswas, K. E. Wilson, N. A. Page. Lasercom test and evaluation station (LTES) development; an update [C]. *SPIE*, 1998, **3266**:22~32
- K. Inagaki, M. Nohara, K. Araki *et al.*. Free-space simulator for laser transmission [C]. *SPIE*, 1991, **1417**:160~169
- K. Inagaki, M. Nohara. Far-field pattern measurement of on-board laser communication equipment by free-space laser transmission simulator [C]. *SPIE*, 1993, **1866**:83~94
- J. D. Gaskill. Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1978
- L. Liu, L. Wang, Z. Luan *et al.*. Physical basis and corresponding instruments for PAT performance testing of inter-satellite laser communication terminals [C]. *SPIE*, 2006, **6304**:40C
- Liu Liren, Wang Lijuan, Luan Zhu *et al.*. Mathematical and physical basis for pointing, acquisition and tracking testing of inter-satellite laser communication terminals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1329~1334  
刘立人,王利娟,栾竹等. 卫星激光通信终端光跟踪检测的数理基础[J]. 光学学报, 2006, **26**(9):1329~1334
- J. Sun, L. Liu, M. Yun *et al.*. The design and fabrication of the satellite relative-movement trajectory simulator for inter-satellite laser communications [C]. *SPIE*, 2005, **5892**:512~519



- 27 J. Sun, L. Yang, L. Liu *et al.*. Large-aperture laser beam scanner for inter-satellite laser communications ground test; assembly and test [C]. *SPIE*, 2006, **6304**-1V
- 28 J. Sun, L. Liu, M. Yun *et al.*. Distortion of beam shape by a rotating double-prism wide-angle laser beam scanner [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(4):043004-1~043004-4
- 29 A. Li, J. Sun, L. Wang *et al.*. Submicroradian accuracy scanning system with a double-wedge rotating around the orthogonal axes [C]. *SPIE*, 2005, **5892**:541~548
- 30 Li Anhu, Sun Jianfeng, Liu Liren. Design principle of performance testing device for laser beam microradian pointing and tracking in intersatellite laser communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):975~980  
李安虎,孙建锋,刘立人. 星间激光通信光束微弧度跟瞄性能检测装置的设计原理[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):975~980
- 31 A. Li, L. Liu, J. Sun *et al.*. Research on scanner of tilting orthogonal double prisms [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31):8063~8069
- 32 A. Li, L. Liu, J. Sun *et al.*. Double-prism scanner for testing tracking performance of inter-satellite laser communication terminals [C]. *SPIE*, 2006, **6304**-1R
- 33 L. Wang, Z. Luan, J. Sun *et al.*. A double-focus collimator system for full PAT performance testing of inter-satellite laser communication terminals [C]. *SPIE*, 2006, **6304**-1T
- 34 S. Teng, L. Liu, Z. Luan *et al.*. Simulative technique to measure beam transmission of in-satellite communications [C]. *SPIE*, 2003, **5160**:417~421
- 35 L. Wan, A. Li, L. Wang *et al.*. Design of an optical testbed for in-lab testing and validation for the intersatellite lasercom terminals [C]. *SPIE*, 2005, **5892**:549~554
- 36 Wan Lingyu, Liu Liren, Zhang Mingli. On-ground simulation technology for free-space laser long-distance propagation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1367~1370  
万玲玉,刘立人,张明丽. 自由空间激光远距离传输的地面模拟[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1367~1370
- 37 Z. Luan, L. Liu, S. Teng *et al.*. Jamin double-shearing interferometer for diffraction limited wavefront test [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**:1819-1824
- 38 Luan Zhu, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Double-shearing wavefront testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1417~1420  
栾竹,刘立人,刘德安等. 双剪切波面干涉测量法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10):1417~1420
- 39 R. Xu, H. Liu, Z. Luan *et al.*. A whole-field double-shearing interferometer for the measurement of diffraction-limit wavefront [C]. *SPIE*, 2005, **5892**-1H
- 40 R. Xu, Z. Luan, H. Liu *et al.*. The measurement of diffraction-limit wavefront with the double-shearing interferometers [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(11):617~623