

文章编号: 0253-2239(2006)09-1329-6

卫星激光通信终端光跟踪检测的数理基础

刘立人 王利娟 栾 竹 孙建锋 刘德安

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 卫星激光通信光束的传播在空间属于远场衍射,而在地面光学跟踪检验中属于近场衍射。采用菲涅耳衍射理论研究了远场衍射和近场衍射对于产生光学跟踪位置误差信号的本质上的差别并且分析了等效条件,证明了近场检验中采用卫星相对角度运动轨迹的光束扫描可以准确模拟远场相对运动,同时也得到了光斑特性和卫星抖动模拟的分析。澄清了卫星激光通信终端光学跟踪性能检验中的基本概念,具有实际指导意义。

关键词: 星间激光通信; 瞄准捕获和跟踪; 远场衍射; 近场衍射; 光束扫描

中图分类号: O438.2 文献标识码: A

Mathematical and Physical Basis for Pointing, Acquisition and Tracking Testing of Inter-Satellite Laser Communication Terminals

Liu Liren Wang Lijuan Luan Zhu Sun Jianfeng Liu Dean

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

Abstract: The propagation of laser beam for inter-satellite laser communications belongs to the far-field diffraction, but the optical testing and verification in the laboratory is on the condition of the near-field diffraction. In terms of the Fresnel diffraction theory, the inherent difference on the optical tracking position errors between the far-field and near-field effects is studied, their equivalent conditions are analyzed. And it is found that the use of beam scanning in the near-field testing can accurately simulate the mutual movement of satellites in the far-field and the trajectory formula for beam scanning is deduced. Investigation on the characteristics of focused spot and the effect from satellite vibration is presented. The results clarify the basic concepts necessary for the testing of optical tracking performance of inter-satellite laser communication terminals, which would provide helps in the ground testing.

Key words: inter-satellite laser communications; pointing, acquisition and tracking; far-field diffraction; near-field diffraction; beam scanning

1 引 言

激光通信具有传输速率高,体积重量小等等优点,在空间具有重要应用前景。欧洲空间局(ESA)在 2001 年 11 月实现了高轨卫星(GEO-ARTEMIS)与低轨卫星(LEO-SPOT4)之间的半导体激光通信计划(SILEX)^[1]。与其相关的日本研制的安装于光学星间通信工程测试卫星(OICETS)上的激光应用通信装置(LUCE)^[2]也于 2005 年 12 月 9 日实现了与 ARTEMIS 的光学双向链接。这些成果开辟了星间激光通信的工业应用可能。

星间激光通信终端由激光通信系统和光学瞄准

捕获跟踪系统两大部分组成,这些系统的性能测试验证不可能在空间进行,而必须事先在地面实验室完成。光学跟瞄性能采用激光平行光管来检验被测终端的方法进行^[3],卫星之间的相对运动采用平行光管移动^[4]或者终端转动的方案模拟^[5]。我们建议了光学扫描器方案,可以获得二维运动模拟^[6,7]。

事实上,在空间从发射终端到接收终端的距离为数百公里到数万公里,光学上属于远场衍射,而地面模拟中从检测发射终端到被测接收终端的距离只为数米左右,属于光学近场衍射。远场衍射和近场衍射有本质上的差别,而所有以前有关光跟瞄检验

作者简介: 刘立人,男,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事激光通信和光学信息处理领域的研究。E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

收稿日期: 2005-12-22; 收到修改稿日期: 2006-02-08

的发表报告中都没有论及这种差别及其对于地面模拟和检测的影响。

本文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。因此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。本文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。这些结论有助于澄清光跟踪检验中的基本概念,对于在地面实验室检验激光通信终端的光学跟踪性能是有实际指导意义的。

2 光束传播基本公式

现在研究从发射终端 A 到接收终端 B 的光束传播的一般化公式(图 1)。设发射端转动角度 $(\theta_{1x}, \theta_{1y})$,接收端转动角度 $(\theta_{2x}, \theta_{2y})$,相互平动 (X_0, Y_0) 。光源 $e_1(x, y)$ 经过准直透镜

$\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2)\right]$ 后成为准直光场 $e_3(x, y)$,其孔径受限为 $p_1(x, y)$,加上偏转等效线性相位因子 $\exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x\sin\theta_{1x} + y\sin\theta_{1y})\right]$ 构成发射场 $e'_3(x, y)$ 。发射场通过距离 Z 的传播后为接收面光场 $e_4(x, y)$,再经过接收孔径 $p_2(x, y)$ 和等效线性相位偏转因子 $\exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x\sin\theta_{2x} + y\sin\theta_{2y})\right]$ 成为终端的接收光场 $e'_5(x, y)$ 。该光场经过透镜 $\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f_2}(x^2 + y^2)\right]$ 的傅里叶变换在位置探测器 CCD 平面上产生跟误差信号 $e_6(x, y)$ 。

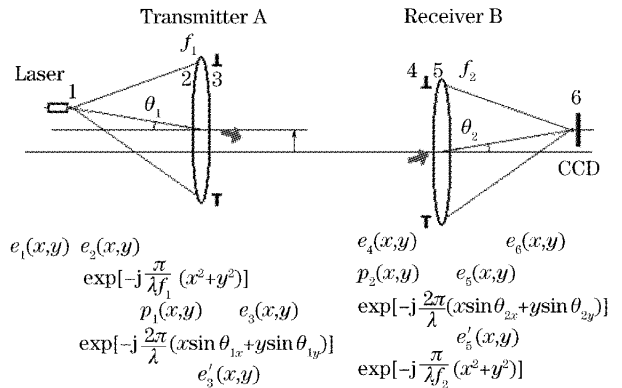


图 1 从发射端到接收端的光束传播示意图

Fig. 1 Beam propagation from a transmitter to a receiver
光源可以为点光源近似 $[e_1(x, y) = A\delta(x, y)]$ 或者高斯光束近似 $[e_1(x, y) = B\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right)]$, 采用高斯光束时应当注意准直方式。孔径函数可以用圆柱函数表达 $[p(x, y) = \text{cyl}(r/d)]$ 。
采用菲涅耳衍射原理[8],可以得到

$$e_3(x, y) = \left\{ \frac{\exp(jkf_1)}{j\lambda f_1} e_1(x, y) \otimes \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2)\right] \right\} \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2)\right] p_1(x, y),$$

$$e'_3(x, y) = \left\{ e_3(x, y) \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x\sin\theta_{1x} + y\sin\theta_{1y})\right] \right\} \otimes \delta(x - X_0, y - Y_0),$$

$$e_4(x, y) = \frac{\exp(jkZ)}{j\lambda Z} \left\{ e'_3(x, y) \otimes \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)\right] \right\},$$

$$e'_5(x, y) = e_4(x, y) p_2(x, y) \exp\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x\sin\theta_{2x} + y\sin\theta_{2y})\right].$$

因此,在终端 B 的光学接收透镜焦面上的场强为

$$e_6(x, y) = \frac{\exp(jkf_2)}{j\lambda f_2} \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_2}(x^2 + y^2)\right] \times [E_4(f_x, f_y) \otimes P_2(f_x, f_y) \otimes \delta(\mu - \sin\theta_{2x}/\lambda, \nu - \sin\theta_{2y}/\lambda)]_{\mu=x/(\lambda f_2), \nu=y/(\lambda f_2)}. \quad (1)$$

3 空间实际条件下的远场衍射

空间卫星之间的传播实际条件为远场夫琅禾费衍射近似,即 $Z \gg \pi(x_3^2 + y_3^2)_{\max}/\lambda$ 。这时在 $e_4(x, y)$ 中有:

$$e'_3(x, y) \otimes \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)\right] = \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)\right] FF\{e'_3(x, y)\}_{\mu=x/(\lambda Z), \nu=y/(\lambda Z)}, \quad (2)$$

其中

$$E'_3(\mu, \nu) E_3(\mu + \sin \theta_{1x}/\lambda, \nu + \sin \theta_{1y}/\lambda) \exp[-2\pi(X_0\mu + Y_0\nu)].$$

事实上接收口径相对于发射光斑很小,接收面为平面波,即

$$E'_3(\mu, \nu) \approx E_3(\sin \theta_{1x}/\lambda, \sin \theta_{1y}/\lambda) \exp[-2\pi(X_0\mu + Y_0\nu)]. \quad (3)$$

所以最终在后焦面上的场强为

$$e_6(x, y) = \frac{\exp(jkf_2)}{j\lambda f_2} \frac{\exp(jkZ)}{j\lambda Z} \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f_2}(x^2 + y^2)\right] \lambda^2 f_2^2 E_3\left(\frac{\sin \theta_{1x}}{\lambda}, \frac{\sin \theta_{1y}}{\lambda}\right) \times \\ \left\{ \delta\left[\left(x + \frac{X_0 f_2}{Z} - f_2 \sin \theta_{2x}, y + \frac{Y_0 f_2}{Z} - f_2 \sin \theta_{2y}\right)\right] \otimes P_2\left(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2}\right) \right\}, \quad (4a)$$

其光强分布为

$$I_6(x, y) = \frac{f_2^2}{Z^2} E_3^2\left(\frac{\sin \theta_{1x}}{\lambda}, \frac{\sin \theta_{1y}}{\lambda}\right) \left| \delta\left[\left(x + \frac{X_0 f_2}{Z} - f_2 \sin \theta_{2x}, y + \frac{Y_0 f_2}{Z} - f_2 \sin \theta_{2y}\right)\right] \otimes P_2\left(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2}\right) \right|_2. \quad (4b)$$

从上述误差信号光强分布可以看到在远场传播下有如下特点:

1) 两终端的平行移动来自于终端的相对轨迹运动,将在接收终端产生跟踪误差信号。

2) 终端的转动来自于终端的轨迹运动和终端本身用于跟踪时的偏转,也包括卫星平台的抖动等噪声。发射端的转动不产生误差信号的角度变化,而只产生误差信号的强度变化,当发射光斑全部偏离出接收孔径时误差信号强度为零。接收终端的转动将产生误差信号的角度变化,由于相互运动轨迹导致的相对平动和接收端偏转将在接收端产生位置误差信号,而接收端根据发生的位置误差进行的随动偏转能够减少误差而保持精密跟踪状态。

3) 接收光斑形状等于接收光学系统的传递函数,而与发射系统无关(较好发射光束质量)。

4) 发射终端的卫星平台抖动在接收终端不产生误差信号的角度变化,而只产生误差信号的强度抖动。接收终端的平台抖动将产生误差信号的角度抖动,影响较大。

4 地面模拟条件下的近场衍射

地面实验室光跟踪检验时,发射终端实际上为检测专用的参考终端,接收终端为被测激光通信终端,双方处于近场菲涅耳衍射近似 $\sqrt{\frac{\pi}{4\lambda}[(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2]_{\max}} \ll Z \ll \frac{\pi(x_3^2 + y_3^2)_{\max}}{\lambda}$ 。

为计算和分析方便并不失一般性,假定近场传播距离为 $Z = f_1$ 。这时

$$e'_3(x, y) = \frac{\exp(jkf_1)}{j\lambda f_1} \left\{ p_1(x, y) FF\left\{e_1(x, y) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2)\right]\right\}_{\mu=x/(\lambda f_1), \nu=y/(\lambda f_1)} \right\} \times \\ \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x \sin \theta_{1x} + y \sin \theta_{1y})\right] \otimes \delta(x - X_0, y - Y_0). \quad (5)$$

检测专用的参考终端由激光平行光管和扫描器组成,在实际设计时检测系统的口径应当远大于被测终端的口径,即 $d_2 \gg d_1$ (也见图 2),而且相对移动时保证被测终端光学能够全孔径接收检测系统发射的波面,因此

$$e_4(x, y) = \frac{\exp(jkf_1)}{j\lambda f_1} \left\{ FF\left\{e_1(x, y) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2)\right]\right\}_{\mu=x/(\lambda f_1), \nu=y/(\lambda f_1)} \right\} \times \\ \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x \sin \theta_{1x} + y \sin \theta_{1y})\right] \otimes \delta(x - X_0, y - Y_0) \otimes \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f_1}(x^2 + y^2)\right], \quad (6a)$$

其傅里叶变换为

$$E_4(\mu, \nu)_{\mu=x/(\lambda f_2), \nu=y/(\lambda f_2)} = \frac{\exp(jk f_1)}{j\lambda f_1} \left\{ e_1 \left(-\frac{x}{f_2/f_1}, -\frac{y}{f_2/f_1} \right) \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda f_2^2/f_1} (x^2 + y^2) \right] \right\} \otimes \left\{ \delta \left[\frac{1}{\lambda f_2} (x + f_2 \sin \theta_{1x}, y + f_2 \sin \theta_{1y}) \right] \right\} \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda f_2} (X_0 x + Y_0 y) \right] \left\{ j\lambda f_1 \exp \left[-j \frac{\pi f_1}{\lambda f_2^2} (x^2 + y^2) \right] \right\}, \quad (6b)$$

所以最终的位置误差信号的光场为

$$e_6(x, y) = \frac{\exp(jk f_1)}{j\lambda f_1} \frac{\exp(jk f_2)}{j\lambda f_2} (j\lambda f_1) (\lambda f_2)^4 \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda f_2} (x^2 + y^2) \right] \times \left\{ e_1 \left(-\frac{x}{f_2/f_1}, \frac{y}{f_2/f_1} \right) \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda f_2^2/f_1} (x^2 + y^2) \right] \right\} \otimes \left\{ \delta(x + f_2 \sin \theta_{1x}, y + f_2 \sin \theta_{1y}) \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda f_2} (X_0 x + Y_0 y) \right] \exp \left[-j \frac{\pi f_1}{\lambda f_2^2} (x^2 + y^2) \right] \right\} \otimes P_2 \left(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2} \right) \otimes \delta(x - f_2 \sin \theta_{2x}, y - f_2 \sin \theta_{2y}), \quad (7)$$

当偏转角度较小时,有

$$e_6(x, y) \approx \frac{\exp(jk f_1)}{j\lambda f_1} \frac{\exp(jk f_2)}{j\lambda f_2} (j\lambda f_1) (\lambda f_2)^4 \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda f_2} (x^2 + y^2) \right] e_1 \left(-\frac{x}{f_2/f_1}, \frac{y}{f_2/f_1} \right) \otimes P_2 \left(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2} \right) \otimes \{ \delta[x + f_2(\sin \theta_{1x} - \sin \theta_{2x}), y + f_2(\sin \theta_{1y} - \sin \theta_{2y})] \}, \quad (8a)$$

即位置误差信号的光强为

$$I_6(x, y) \approx (\lambda f_2)^3 \times \left| e_1 \left(-\frac{x}{f_2/f_1}, -\frac{y}{f_2/f_1} \right) \otimes P_2 \left(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2} \right) \otimes \delta[x + f_2(\sin \theta_{1x} - \sin \theta_{2x}), y + f_2(\sin \theta_{1y} - \sin \theta_{2y})] \right|^2. \quad (8b)$$

从上述误差信号光强分布可见在近场传播时具有的特点如下:

1) 检测用系统与被测接收终端的相对平行移动不会在被测终端产生跟踪误差信号。

2) 检测系统的转动(或光束偏转)和接收终端的转动都将产生跟踪误差信号的角度变化,因此检验系统的转动(或光束偏转)能够模拟卫星之间的相对运动,而接收终端的转动用于跟踪检验系统的光束偏转,达到光跟踪性能检验的目的。

3) 接收光斑形状大体上等于接收光学系统传递函数与检测系统光源光场分布的卷积,发射光源的质量将影响跟踪检验结果。

4) 在检测系统中抖动发射光束,可以模拟被测接收终端本身抖动的环境。

5 模拟远场传播的近场光学跟瞄检验装置

根据分析并比较(6b)式和(11b)式,可见在近场条件下可以采用检测系统的光束角度偏转来模拟远场条件下的终端相对平移和偏转运动及其轨迹。

检验空间激光通信终端的光跟踪性能的系统装置的设计如图2所示。激光平行光管产生的大口径

平行光束通过光束扫描器向被测激光通信终端发射,光束扫描器模拟卫星之间相对运动有关的角度变化轨迹,被测终端跟踪该光束并同时发射信号光束,该光束的空间位置(即跟踪精度)可以在平行光管的 CCD 上进行测量。平行光管中的反射镜可以用于被测终端的卫星平台抖动模拟,光束扫描采用双棱镜旋转的原理^[9]。

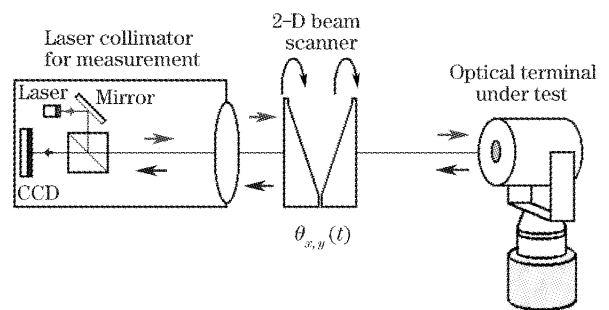


图2 模拟远场两个终端相对运动的光学系统
Fig. 2 Optical system to simulate the far-field environment between two terminals

现在研究卫星相对运动轨迹的光学扫描等效模拟方法。为简单起见,假设为一个高轨卫星(GEO)和低轨卫星(LEO)的系统,并运动在同一平面内(见图3)。低轨卫星的角速度为 αt ,其地心高度为 R ;而高轨卫星的地心高度为 H 。

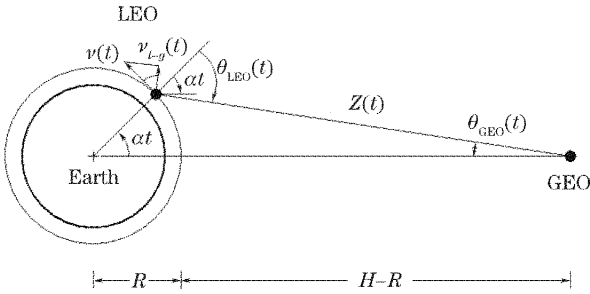


图 3 高轨卫星和低轨卫星之间运动轨迹示意
Fig. 3 Motion trajectory between a GEO and a LEO

可以求得两个卫星之间的作用距离为：

$$Z(t) = \sqrt{H^2 + R^2 - 2HR \cos \alpha t}. \quad (9)$$

测量装置模拟低轨卫星看高轨卫星的偏转角度 θ_{GEO} 和模拟高轨卫星看低轨卫星的偏转角度 θ_{LEO} 分别为

$$\theta_{GEO}(t) = \arctan\left(\frac{R \sin \alpha t}{H - R \cos \alpha t}\right), \quad (10a)$$

$$\theta_{LEO}(t) = \theta_{GEO}(t) + \alpha t, \quad (10b)$$

上述运动角度的时间变化率分别为

$$\frac{d\theta_{GEO}(t)}{dt} = \alpha R \frac{H \cos \alpha t - R}{Z^2(t)}, \quad (11a)$$

$$\frac{d\theta_{LEO}(t)}{dt} = \frac{d\theta_{GEO}}{dt} + \alpha. \quad (11b)$$

实际上，终端的偏转角度应该为两个终端之间平动产生的角度和终端自身转动的角度之和。远场的相对平移等效角度变化率也能够图 3 中求出，这时低轨卫星的线速度为 $v(t) = \alpha R$ ，而相对于高轨卫星的正交线运动速度为 $v_{t-g}(t) = v(t) \cos \theta_{LEO}(t)$ ，因此平动产生的等效角度为 $\theta_1(t)$ ，其变化率为 $\frac{d\theta_1(t)}{dt} = \frac{v_{t-g}(t)}{Z(t)}$ ，

即

$$\frac{d\theta_1(t)}{dt} = \alpha R \frac{H \cos \alpha t - R}{Z^2(t)}. \quad (12)$$

在精密跟踪的条件下，扫描器的扫描角度变化率等于被测终端远场的相对平移等效角变化率和角偏转速率。因此测量装置模拟低轨卫星看高轨卫星的偏转角度变化率应当等于远场的相对平移等效角变化率，即

$$\frac{d\theta'_{GEO}(t)}{dt} = \frac{d\theta_1(t)}{dt} = \alpha R \frac{H \cos \alpha t - R}{Z^2(t)}, \quad (13a)$$

而模拟高轨卫星看低轨卫星的偏转角度变化率应当等于远场的相对平移等效角变化率加上低轨卫星本身的旋转速率，即

$$\frac{d\theta'_{LEO}(t)}{dt} = \frac{d\theta_1(t)}{dt} + \frac{d(\alpha t)}{dt} = \alpha R \frac{H \cos \alpha t - R}{Z^2(t)} + \alpha. \quad (13b)$$

因此测量装置模拟低轨卫星看高轨卫星的扫描偏转角度和模拟高轨卫星看低轨卫星的扫描偏转角度分别为积分：

$$\theta'_{GEO}(t) = \int_0^t \frac{d\theta'_{GEO}(t)}{dt} dt = \arctan\left(\frac{R \sin \alpha t}{H - R \cos \alpha t}\right), \quad (14a)$$

$$\theta'_{LEO}(t) = \int_0^t \frac{d\theta'_{LEO}(t)}{dt} dt = \arctan\left(\frac{R \sin \alpha t}{H - R \cos \alpha t}\right) + \alpha t, \quad (14b)$$

也就是说：测量系统的发射光束的偏转刚好与先前计算的结果(10a)式和(10b)式相同，按照(14a)式或者(14b)式的方式进行扫描可以准确模拟高轨卫星或者低轨卫星的等效远场轨迹。

上述二维情况可以进一步推广到卫星三维运动轨迹状态。可以看到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在远场实际条件下的卫星相对运动。

星间激光通信终端及其光学跟瞄检验系统的典型数据如下：高轨卫星高度 35786.6 km，低轨卫星高度 832 km/SPOT4(或 600 km/OICETS)，角速度 0.0549°/s(或 0.0579°/s)，跟踪精度为 1 μrad 左右，地球半径 6378.14 km，高轨卫星-低轨卫星通信最大距离 45000 km，激光通信终端光学口径 φ250 mm，信号激光发散度约 10 μrad，测量激光平行光管口径 φ450 mm，双棱镜扫描器口径 φ450 mm。

6 结 论

空间激光通信远场衍射下的跟踪性能检验可以采用激光平行光管和光束扫描器相组合的系统进行。远场条件下接收终端位置误差信号的是由于两个终端之间的相对平动和接收端的偏转所产生，而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，但发射端和接收端的偏转都产生位置误差信号的变动，因此在地面实验室条件下必须注意这种差别。本文给出了模拟卫星相对运动的光束扫描轨迹的推导，证明了在近场检验中采用卫星相对角度运动轨迹的光束扫描可以准确模拟远场的卫星相对运动。

分析也表明远场实际条件下接收光斑花样为接收光学单方的传递函数，而近场条件下接收光斑为发射光源光场分布与接收光学传递函数的卷积，这

