

文章编号: 0253-2239(2006)01-0007-4

## 卫星激光通信均匀信标光的研究\*

王建民 汤俊雄 孙东喜 朱彦 谷亚权

(北京大学电子学系量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 采用信标光是完成卫星激光通信捕获过程的一种重要手段, 信标光的远场分布对捕捉概率和捕获时间有较大的影响。为满足通信系统的性能要求, 对信标的远场分布提出一定的要求是必要的。首先从理论计算的角度, 分析了远场高斯分布信标光对卫星激光通信捕获过程的影响, 认为在存在光束抖动的情况下, 均匀信标光在捕获阶段具有明显的优势。基于多激光器合束技术, 利用半导体激光器设计了一个能实现远场均匀分布的信标光模块。给出了模块结构, 分析了均匀信标光产生的机理, 并从理论上推导了该模块的远场光强分布表达式。实验表明, 所研制的均匀信标光模块可出射功率超过 3.8 W, 不均匀度小于 11% 的远场均匀信标光, 透光效率为 54%, 从而证明了所设计的信标光模块的可行性。

**关键词:** 卫星激光通信; 均匀信标光; 半导体激光器; 光纤

中图分类号: TN929 文献标识码: A

## Study on the Uniform Beacon Used for the Free Space Laser Communication

Wang Jianmin Tang Junxiong Sun Dongxi Zhu Yan Gu Yaquan

(Department of Electronics, Key Laboratory of Quantum Information and Measurement of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract:** Using a beacon in the free space laser communication system is an important method of finishing the acquisition course. The far-field distribution of a beacon affects seriously the acquisition time and acquisition probability. In order to satisfy practical performance requirements, it is necessary to design the far-field distribution of a beacon. First, the impact of a far-field Gaussian distribution beacon on the acquisition course of laser communication is analysed and the far-field uniform beacon has some advantage compared with the far field Gaussian beacon in the case of transmitting beam jitter. One kind of far-field uniform beacon model is developed on the base of combination of semiconductor lasers. The structure of the model is described, the operating principle of model is analysed and the far-field distribution expression of the beam is derived. Experiment's data indicate that transmitting power of the model is more than 3.8 W, the degree of non-uniformity is less than 11% and the coupling efficiency is 54%, so the feasibility of the model is proved.

**Key words:** free space laser communication; uniform beacon; semiconductor laser; fiber

### 1 引言

卫星激光通信因具有数据率高、保密性好、功耗低、体积小、重量轻等优点, 受到了世界很多国家的重视。由于受到卫星姿态误差、轨道误差、通信端机指向误差等因素的影响, 使得通信端机发射的激光束存在一个瞄准不确定角, 这个角度一般为零点几度大小。另一方面, 卫星激光通信发射的通信激光束的发散角都比较小, 一般只有几十微弧度, 因此,

为了能快速捕获到对方卫星, 要采用信标光对瞄准不确定范围进行扫描, 信标光的发散角相对较大, 如几百微弧度。信标光按一定方式(如光栅式、螺旋式)对子区进行扫描, 当对方卫星通信端机的捕获传感器接收到光信号时, 要对其进行判别, 以确定是否是真正的信标信号。另外, 由于卫星平台存在一些扰动源, 如太阳能帆板、通信端机粗瞄万向节、动量轮等, 使得信标光的指向存在一定范围的“抖动”, 从

\* 国家自然科学基金(60377028)和国防重点实验室基金(51473040205-JW0201)资助课题。

作者简介: 王建民(1967~), 男, 黑龙江五常市人, 北京大学电子学系量子信息与测量教育部重点实验室副教授, 博士, 主要从事卫星激光通信、图像技术及精密测试技术研究。E-mail: jmwang@ele.pku.edu.cn

收稿日期: 2004-12-13; 收到修改稿日期: 2005-03-28

而直接影响到对方卫星捕获传感器接收能量的大小,进而影响到整个捕获过程。信标光从远场分布来看,可分为高斯分布和均匀分布,高斯信标光应用较多,而均匀信标光应用和研究较少,只有欧洲卫星激光通信 SILEX 计划宣称其采用了均匀信标光<sup>[1]</sup>,但并没有公布其技术细节,也没有理论分析。通常,激光器出射的光束为高斯分布,或可以整形为高斯分布,能够实现高斯光束均匀化的方法有很多<sup>[2,3]</sup>,但往往是在近场产生均匀分布,而均匀信标光是指远场均匀分布。注意,这里所谓的均匀光束并非是指数学中的理想矩形分布的光束,而是指其远场分布虽有一定的波动,但可近似看作均匀分布,即存在不均匀度的问题。本文给出了一种基于激光器合束的远场均匀信标光模块,并论述了均匀信标光束产生的机理。

## 2 信标光远场分布对系统捕捉的影响

先分析高斯分布信标光对捕捉的影响。对方通信端机接收的光功率为

$$P_R = \frac{P_T}{\pi(\alpha/2)^2} \frac{A}{z^2} \eta_T \eta_R \eta_p, \quad (1)$$

其中  $P_T$  为发射光功率,  $\alpha$  为发散角,  $A$  为接收望远镜面积,  $z$  为传输距离,  $\eta_T$  为发射端光学传输率,  $\eta_R$  为接收端光学传输率,  $\eta_p$  是瞄准偏差功率损耗因子。根据文献<sup>[4]</sup>的结论,由于卫星平台扰动的原因,造成瞄准偏差的分布为瑞利分布:

$$p(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right), \quad (2)$$

其中  $\sigma_\theta$  为光束抖动的均方差。瞄准偏差功率损耗因子满足<sup>[4]</sup>

$$\eta_p = \exp[-(2\theta/\alpha)^2]. \quad (3)$$

接收机接收到的平均功率应该是(1)式所得到

功率的积分。考虑在光束抖动的情况下,接收机接收到的平均功率表示为

$$\bar{P}_R = \int_0^\infty P_R p(\theta) d\theta = \frac{4P_T \eta_T \eta_R A}{\pi(8\sigma_\theta^2 + \alpha^2)z^2}. \quad (4)$$

用欧洲 SILEX 系统的参量代入计算通信端机在光束抖动情况下接收的平均功率。该系统捕捉阶段的具体参量为<sup>[5]</sup>:  $P_T = 19 \times 700 \text{ mW}$ ,  $A = 0.0509 \text{ m}^2$ ,  $\alpha = 750 \text{ } \mu\text{rad}$ ,  $\eta_T$ 、 $\eta_R$  均分别取大约值 0.5 和 0.5,  $z$  取 42000 km, 得到图 1 的结果。

由图 1 可以看出,  $\sigma_\theta$  小于 50  $\mu\text{rad}$ , 功率下降不大, 约 9 pW, 而  $\sigma_\theta$  超过 100  $\mu\text{rad}$  时, 功率已经下降约 28 pW, 如果光斑检测的阈值设为 -75 dBm, 即 32 pW, 两者已经非常接近, 因此容易产生误判, 降低检测概率, 进而降低了捕捉概率。如采用均匀信标光, 通信端机接收的功率几乎不变, 这样就保证了光斑的稳定判别, 从而保证了捕捉概率。

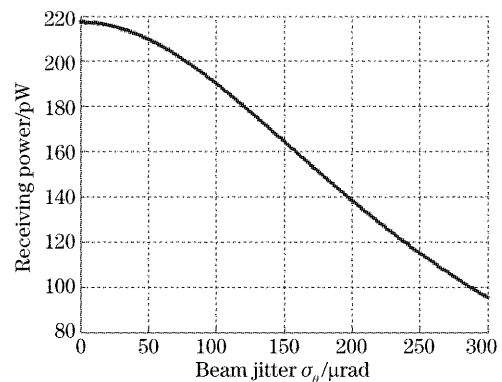


图 1 通信端机接收功率

Fig. 1 Receiving power curve of the communication machine

## 3 基于多激光器合束的信标光模块

基于激光器的合束技术, 设计了如图 2 所示的远场均匀信标光模块。

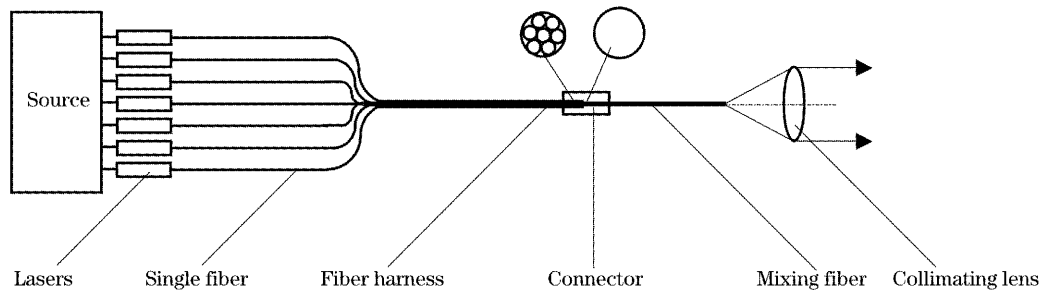


图 2 信标光模块结构图

Fig. 2 Structural drawing of the beacon laser module

模块中采用了 7 个半导体激光器, 每个半导体激光器可输出 1 W 的功率。把每个半导体激光器

出射的光束耦合到单根纯石英阶跃多模光纤中, 光纤直径为 200  $\mu\text{m}$ , 芯径 190  $\mu\text{m}$ , 数值孔径  $NA$  为

0.22, 每根光纤长度为 60 cm, 光纤出射端合成圆形的捆束。合束后的光纤捆束经过一个光纤连接器, 和一个粗混合光纤连接, 混合光纤为纯石英阶跃光纤, 直径为 900, 长度为 0.6 m, 芯径 860  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22。最后, 混合光纤再经过一个准直镜进行准直, 达到所要求的信标光发散角。这里的混合光纤就是一般的粗多模光纤, 所谓“混合”的含义是指模式和光束的混合, 下面予以说明。

#### 4 均匀信光模块远场分布理论模型

光纤捆束的作用就是把分散的激光二极管的激光束整合起来, 形成一个次级光源, 捆束的形状和直径大小影响着与下一级混合光纤的耦合效率和出射光强的分布。激光器是相干性光源, 发出的光注入到多模光纤中, 功率会分配到光纤中的多模式中去, 只要这些模式保持相对的相位相干性, 则在光纤尾端的光强分布就会有很多光强分布不均的斑点产生, 这是由于传播模式间在给定平面上的相长干涉和相消干涉造成的。激光器的出射光经过光纤捆束中的单根多模光纤, 减弱了光强的相干性。另外, 光纤捆束中单独的光纤分别导出不同激光器的光能量, 形成一个拼盘形状, 它们之间的相干性更低。因此, 这样形成的次级光源是一个相干性较弱的光源, 减弱了模斑现象, 提高了下一级的多模光纤的出射均匀度。光纤捆束通过光纤连接器与混合光纤对接。根据光纤模式容量的模型, 由  $n$  根光纤组成的捆束中可以存在的模式为原来的倍, 模式数目的计算公式为<sup>[6]</sup>

$$M_F \approx (\pi D_F NA / \lambda)^2 / 2, \quad (5)$$

其中  $M_F$  为模式数,  $NA$  为数值孔径,  $\lambda$  为波长,  $D_F$  为光纤芯径。由此可知, 模式数跟光纤芯径的平方成正比。因此, 900  $\mu\text{m}$  粗的多模光纤中存在的模式数量是 200  $\mu\text{m}$  的多模光纤中存在的模式数量的 20.5 倍, 捆束中存在的模式数量是 200  $\mu\text{m}$  多模光纤的 7 倍, 因此在模式数目容量上不存在损失的问题。

混合光纤的作用在于, 利用多模光纤的模式特性, 把光纤捆束的输入光强在光纤内部再次变换, 重新激励起模式, 最后在光纤的输出端面上产生分布较为均匀的光强。

为推导信标光模块的远场分布表达式, 采用非相干平顶高斯光束来描述从混合光纤端面出射的光束。在  $z=0$  处非相干平顶高斯光束的光强分布  $I(r, 0)$  可写为<sup>[7]</sup>

$$I(r, 0) = \frac{2}{\pi \omega_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \sum_{m=0}^N \frac{1}{m!} \left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right)^m, \quad (6)$$

其中  $\omega_0' = \omega_0 / \sqrt{N+1}$ ,  $\omega_0$  为光腰。从混合光纤出射到信标光远场分布, 可用图 3 的过程描述。

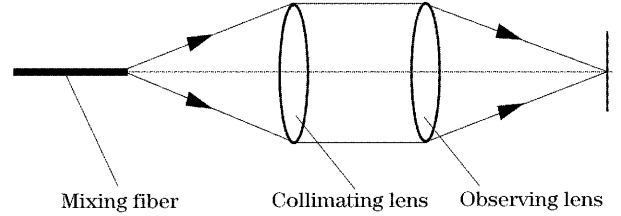


图 3 信标光模块测试方法

Fig. 3 Observation method of the beacon laser module

假设准直镜的焦距为  $f_1$ , 两个透镜相距  $a$ , 观察透镜的焦距为  $f_2$ 。当光线顺序沿  $z$  轴穿过  $m$  个元件组成的系统时, 其变换矩阵  $T$  为<sup>[8]</sup>

$$T = T_m T_{m-1} \cdots T_1 = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (7)$$

由此得到变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -f_2/f_1 & 0 \\ -1/f_2 + a/(f_1 f_2) - 1/f_1 & -f_1/f_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

根据非相干平顶高斯光束的变换公式:<sup>[7]</sup>

$$I(r, z) = \frac{2}{\pi \omega_1^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right) \sum_{m=0}^N \frac{1}{m!} \left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right)^m, \quad (9)$$

其中  $\omega_1 = \omega_0' \sqrt{A^2 + \left(\frac{\lambda B}{\pi \omega_0}\right)^2}$ ,  $\omega_0'$  为变换前的光束的光腰。

(9) 式为信标光光模块的远场分布公式, 由此可以看出, 远场分布仍为非相干平顶高斯光束分布。

#### 5 实验结果

利用 CCD 激光光束参量测量仪对研制的信标光模块进行远场分布测试, 测试的基本原理是把均匀信标光模块准确放置于一个长焦距透镜的焦平面上(焦距  $f=0.5 \text{ m}$ )<sup>[9,10]</sup>, 得到图 4 和图 5 的结果, 两图中的较平滑的曲线为利用一定平滑算法进行平滑的结果。图 4 为混合光纤处于直线形状下的测试结果, 而图 5 为混合光纤在弯曲情况下的测试结果。

为了评价光斑质量的好坏, 定义了光强分布的不均匀度  $U$ :

$$U = \frac{\sum |I - \bar{I}|}{\sum I}, \quad (10)$$

其中  $\bar{I}$  为平均光强。先求得光斑的半径大小和中

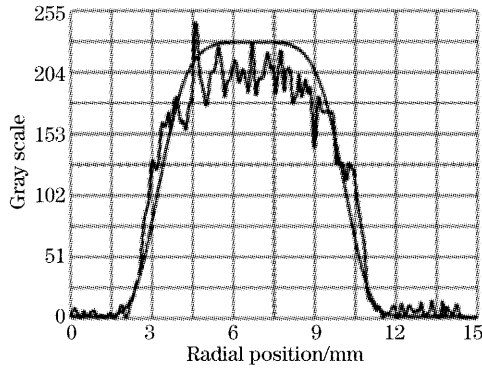


图 4 信标光模块远场分布(直)

Fig. 4 Far-field distribution of the beacon laser module (straight)

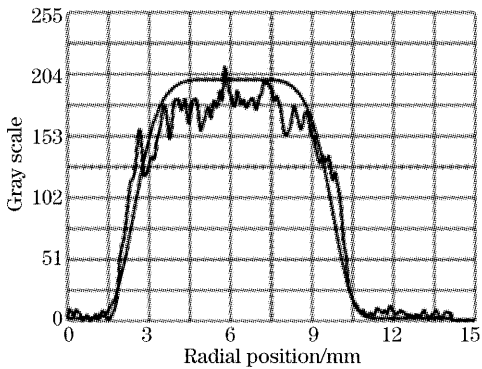


图 5 信标光模块远场分布(弯曲)

Fig. 5 Far-field distribution of the beacon laser module (winding)

心,然后计算出光斑大小所在范围内的不均匀度。

表 1 为混合光纤在不同的弯曲状态下的不均匀度数据。

表 1 不同弯曲状态下的非均匀度

Table 1 The degree of non-uniformity under different winding states

Current /A	Voltage /V	Degree of non-uniformity (straight)	Degree of non-uniformity (curving form)
3.02	6.0	0.1976	0.0981
3.52	6.0	0.2106	0.0897
4.00	6.0	0.1282	0.0965
4.52	6.0	0.1397	0.1015
5.00	6.1	0.1319	0.1022
5.50	6.1	0.1508	0.1096
6.01	6.2	0.1370	0.1252
6.49	6.2	0.1277	0.1176
Mean of the degree of non-uniformity		0.1529	0.1051

在混合光纤直的状态下,不均匀度约为 15%,而在弯曲形状下不均匀度约为 11%。整个模块的透光效率是  $3.8 \text{ W}/7 \text{ W}=54\%$ 。

## 6 结 论

由实验结果可以看出,所设计的均匀信标光模块具有很好的均匀性,理论分析和实验结果相符,由此证明,基于激光器合束的均匀信标光模块是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 D. Malaise, M. Renard. Silex beacon[C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1635**: 337~344
- 2 Zhang Xiping, Xu Pinfang. Analysis and design of aspherical lens system for Gaussian beam uniformation[J]. *Applied Optics*, 1994, **15**(3): 12~15 (in Chinese)  
张新平,徐品方. 用于高斯光束均匀化的非球面透镜系统分析与设计[J]. *应用光学*, 1994, **15**(3): 12~15
- 3 Lü Baida, Cai Bangwei, Zhang Bin. Spatial shaping and uniform irradiation on the target of high power lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 25~28 (in Chinese)  
吕百达,蔡帮维,张彬. 强激光的空间整形和靶面均匀辐照技术[J]. *红外与激光工程*, 1999, **28**(1): 25~28
- 4 Chien-Chung Chen, Chester S. Gardner. Impact of Random pointing and tracking error on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, **37**(3): 252~260
- 5 Gotthard Oppenhauser. Silex program status — a major milestone is reached[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**: 2~9
- 6 Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. *Optical Telecommunications* [M]. Chen Genxiang, Qin Yuwen transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. 154 (in Chinese)  
Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. 光通信技术与应用[M]. 陈根祥,秦玉文等译. 北京: 电子工业出版社, 1998. 154
- 7 Lü Baida, Luo Shirong, Zhang Bin. A comparison study of coherent and incoherent flattened Gaussian beams[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(2): 110~113 (in Chinese)  
吕百达,罗时荣,张彬. 相干和非相干平顶高斯光束的比较研究[J]. *激光技术*, 2000, **24**(2): 110~113
- 8 Lü Baida. *Laser Optics Beam Characterization, Propagation Transformation, Resonator Technology and Physics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 106 (in Chinese)  
吕百达. 激光光学, 光束描述, 传输与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 106
- 9 Chen Jun, Huang Peng. Exact measurement of the far field divergence of the laser beam using CCD camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(4): 552~556 (in Chinese)  
陈军,黄鹏. 利用 CCD 准确测量激光远场发散角[J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(4): 552~556
- 10 Zhou Qincun, Dai Daozi, Sheng Zhongyan *et al.*. Calculation of the far field pattern from a planar wave guide using a modified Gaussian beam approximation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 587~592 (in Chinese)  
周勤存,戴道子,盛钟延等. 高斯光束计算平板波导自由传输区远场分布及其修正[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 587~592