

# 空间光通信收发端机性能分析与设计\*

李 贤\*\* 曾广荣 徐 铭

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 讨论了大气激光通信系统光收, 发端机的功能和基本组成。激光器和探测器是收发端机的核心部件, 描述了它们的特点和性能。通常采用信标光和信号光分离的方法来实现光通信系统的搜索、捕获和跟踪功能。对可供选择的探测器 CCD、PSD、4Q-PIN、4Q-APD 的特点进行了分析, 选择的依据主要是接收视场角、灵敏度和位置分辨率。

**关键词** 激光通信系统; 收发端机; 激光器; 探测器  
中图分类号 TN929.1

收发端机是空间光通信系统核心部件之一。发端机的主要任务是完成信息对光源的调制, 并借助光学天线发向对方。收端机的主要功能是接收对方发来的光信号, 进行光电转换, 通过放大、解调等电处理, 从而完成通信任务。

对一个具有搜索、捕获和跟踪 (Acquisition, Tracking, Pointing—ATP) 功能的空间光通信系统, 除信号光外, 还应有完成 ATP 功能的信标光源和相应的误差信号检测单元。

总的来看, 一个具有 ATP 功能的空间光通信系统, 其收发端机应具有下述功能: 发射信标光; 发射信号光; 探测对方发来的信标光, 确定信标光方位, 给出误差信号使 ATP 系统校正接收天线的方位, 完成双方光天线的相对准; 在天线已粗对准的情况下, 探测对方发来的信号光, 并利用信号光在四象限探测器上的坐标, 提供方位误差信号给 ATP 单元完成双方天线的精对准和跟踪任务; 探测对方发来的信号光, 通过放大, 解调等电处理, 完成通信任务。

本文将半导体激光器为光源的空间光通信系统为例, 讨论信标光和信号光的发射与接收, 方位误差信号的提取等收发技术方面的问题。

## 1 信标光的发射与接收

信标光的使用对于一个具有 ATP 功能的通信系统来说是必不可少的。本单元主要完成系统端机间方位误差信号的提取, 以实现粗对准。信标光激光器及驱动源、准直系统、接收探测器和相应的电子处理电路是本单元的主要组成部分。

### 1) 信标光激光器的选择

选择激光器的主要因素是中心波长、输出功率、准直性能、谱线宽及温度稳定性等。工作波长的选择应注意与信号光激光器中心波长相区别, 较大的差别有利于信标光, 信号光接收时的分离, 从而避免相互之间的干扰。

输出功率也是选择激光器的主要考虑因素。由于信标光通常具有较大的束散角。因此, 光能的几何损耗较大, 故通常选择有较大功率输出的激光器。

设激光器的输出功率为  $P_0$ , 探测器接收到的光功率为  $P_L$ , 则有

$$P_L = P_0 \eta_T \eta_R e^{-\alpha} \frac{d_r^2}{\theta L^2} \quad (1)$$

式中  $\eta_T$  为发射天线效率;  $\eta_R$  为接收天线效率;  $d_r$  为接受天线口径;  $\theta$  为发射光束散角;  $L$  为

1998 年 7 月 8 日收稿

\* 国防科研基金资助项目

\*\* 男 55 岁 大学 副教授

传输距离;  $\alpha$  为大气衰减系数。令  $\eta_T = 0.5$ ,  $\eta_R = 0.2$ ,  $L = 3 \text{ km}$ ,  $\theta = 5 \text{ mrad}$ ,  $d_r = 10 \text{ cm}$ ,  $\alpha = 3 \text{ dB/km}$ , 则

$$P_L = P_0 \times 0.5 \times 0.2 \times e^{-0.5 \times 3} \times \left[ \frac{0.1}{5 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3} \right]^2 = 1 \times 10^{-6} P_0 \quad (2)$$

在上述系统参数的条件下, 如欲在探测器光敏面上接收到  $1 \mu\text{W}$  的光功率, 要求发射激光器至少应有  $1 \text{ W}$  的功率输出。同时, 还必须考虑整机调整误差、信道在极差情况下的损耗增加、湍流影响、激光器寿命等, 留有充分的余量。

## 2) 激光器驱动源

激光器驱动源应提供足够大的工作电流并具有调制功能, 为保证系统正常工作, 还应有输出功率控制和激光器工作温度控制功能。由于一般激光器的中心波长随温度均每摄氏度有  $0.3 \text{ nm}$  左右的温度漂移, 这给滤光片的选取带来了困难。此外, 过高的工作温度将使激光器的寿命降低。因此, 恒温控制是必须的。

## 3) 信标光探测器

探测器是接收系统的核心部件, 它的性能优劣直接影响到整机性能的好坏。选择探测器的主要依据是接收视场角、灵敏度、分辨率等方面。

(1) 接收视场角 探测器应有合适的接收视场角, 较大的视场角有利于缩短捕获时间, 但视场角的增加亦会使背景光干扰增大, 使接收灵敏度降低。因此在满足整机设计指标要求前提下, 确定合适的接收视场角是十分必要的。视场角  $F$  可由下式决定

$$F = 2 \arctan \frac{d_r}{2f} \quad (3)$$

式中  $f$  为接收天线的等效焦距;  $d_r$  为探测器口径; 可见较大的探测器口径及较小的等效焦距有利于视场角的增大。

若选用  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的位置敏感探测器作为信标光探测器件, 天线等效焦距设计为  $600 \text{ mm}$ , 则有

$$F = 2 \arctan \frac{10}{2 \times 600} = 0.95^\circ$$

(2) 接收灵敏度 尽量选择灵敏度高的探测器件, 当然, 整机的灵敏度还依赖于前放的热噪声和背景光噪声的大小。可以设计合适的低噪声前放和采取抑制背景光噪声的措施, 如加装合适半宽度的滤光片等。此外, 我们可以对信标光加以固定频率的调制, 在接收端处理电路上加装窄带滤波器, 能使大部分噪声得以滤除使信噪比提高, 这种方法对于滤除固定强度、均匀背景光产生的直流输出是十分有效的。

(3) 角分辨率 探测器的空间分辨率表征了探测器对信标光方位的分辨能力, 直接关系到系统的精度, 当然, 系统角分辨率的大小还和接收天线的等效焦距及处理电路的设计有关。如以  $\hat{q}$  表示角分辨率, 则有

$$\hat{q} = \frac{d}{F} \quad (4)$$

其中  $F$  为天线的等效焦距。而  $d$  的含义可作如下解释: 且假定以  $5 \text{ V}$  的电压为基准, 处理电路为 11 位, 则每位的信号电压变化为  $5000/2000 = 2.5 \text{ mV}$ ,  $d$  表示当输出信号变化  $2.5 \text{ mV}$  时, 照射至探测器上的光斑重心在探测器上移动的距离。

整个系统的角分辨率还受到其他因素的影响, 仅就接收系统而言就有: 放大器、探测器的噪声, 四象限探测器放大电路一致性等。

#### 4) 几种适用的信标光粗对准探测器

(1) CCD CCD 是一种十分成熟的器件, 使用 CCD 作为信标光接收的粗对准探测器, 每一个光敏元对应于光天线的每一个方位。由于每一个光敏元间的几何尺寸十分精确, 可获得  $10^4\text{m}$  左右的定位精度。此外, CCD 的理想线性扫描特性、高空间分辨率、可数字扫描、高灵敏和大动态范围等优点, 使其成为粗对准系统的理想探测器之一, 国外卫星光通信系统试验方案大多数采用 CCD 作为粗对准单元探测器<sup>[1, 2]</sup>。不过, CCD 是一种电荷积累型器件, 不能用低频调制的方法达到抑制噪声以提高信噪比的目的, 因此, 在有非均匀的背景光干扰的地面激光通信系统中不宜采用。

(2) 位置敏感探测器—PSD PSD 是利用“横向光效应”原理, 由极为均匀的表面电阻层和对向电极检出信号, 并通过放大和运算获得被测位置。PSD 的信号处理电路较简单, 光敏面上无死区, 可获得连续的位置检出信号。可用低频调制的方法抑制背景光的干扰。PSD 灵敏度较低, 边缘线性较差, 在作用距离不太长的地面光通信系统中是可采用的探测器之一。

(3) 四象限 PIN 光电二极管—4Q-PIN 4Q-PIN 的具有较高的灵敏度, 是适合于光通信系统粗对准的探测器之一。选择面积较大的 4Q-PIN, 可以满足系统接收视场角的要求。目前直径大于的 4Q-PIN 已很成熟。

## 2 精对准及跟踪探测器

当系统完成了粗对准, 便进入了精对准及跟踪状态, 精对准的功能是进一步提高对准精度并相互跟踪。不难理解, 粗对准探测器的接收视场角必须大于粗对准探测器所能分辨的入射角。典型的精对准及跟踪探测器是四象限雪崩光电二极管 (APD)。

1) 4Q-APD 的接收视场角 以  $\Phi_2$  尺寸的 4Q-APD 为例。当天线等效焦距为  $F$ , 其接收视场角为

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2 \arctan \frac{2}{2 \times 600} = 0.13 \quad (5)$$

当使用上述探测器作为精对准探测器的时候, 粗对准探测器的对准精度必须大于  $0.13^\circ$ 。

2) 4Q-APD 的灵敏度 在仅考虑热噪声的前提下, 文献 [3] 给出了 Si-APD 的最小可探功率表达式为

$$P_{r \min} = \frac{\left( \frac{2 \times 4KTB}{RL} \right)^{1/2} \frac{hv}{e}}{M\eta} \quad (6)$$

式中  $M$  为倍增因子, 正是由于  $M$  的存在使得  $P_{r \min}$  得以降低, 使其灵敏度提高。

3) 4Q-APD 的位置分辨率 对 4Q-APD 光斑位置与相邻二象限的输出特性进行了测试, 发现在平衡点附近的曲线较 4Q-PIN 有更大的斜率, 表明 4Q-APD 有较 4Q-PIN 更好的位置分辨率。

## 3 信号光的发射和接收

信号光的发射和接收和信标光的发射和接收有许多相似之处, 下面仅就其中的几点不同之处加以说明。

信标光由于有较小的发射角, 光能几何损耗较小, 同时考虑高传输码率情况下的调制性能, 可以选择较小功率的激光器, 如几十毫瓦。

1) 信号光激光器的驱动源可输出较小的驱动电流, 但必须有与传输码率对应的调制能力。

2) APD 是通常选用的信号光探测器。其接收视场角应大于精对准探测器能分辨的角度。

3) 信号光激光器中心波长的选择应与信标光有所差异。较大的差异有利于信标光和信号光的分离。

## 4 结 论

本文讨论了大气激光通信系统光收、发端机的基本组成和功能。对于具有 ATP 功能的通信系统,除信号光外,必须借助于信标光实现对准和跟踪。CCD、PSD 和 4Q-PIN 是实现粗对准可供选择的探测器,它们各有其特点,选择的主要依据是接收视场角,灵敏度和位置分辨率。精对准和跟踪探测器亦可选择较小尺寸和较少光敏元的 CCD、小面积 4Q-PIN 或 4Q-APD。比较而言,4Q-APD 是通常人们采用的探测器,它具有较高的灵敏度和位置分辨率,而且 APD 是最重要的信号光探测器。

探测器的前置放大器应具有低噪声和适当的带宽等特点,对于四象限探测器而言,4 个象限的放大器应有尽量好的一致性和稳定性,否则将对位置分辨率产生不利的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Laurent B, Planche G. SILEX overview after flight terminals campaign. Proc SPIE, 1997, 2 990; 10 ~ 22
- 2 Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M *et al.* Preliminary result on laser communication experiment using (ETS-VI). SPIE, 1995, 2 381; 151 ~ 159
- 3 谭显裕. 脉冲激光测距仪光电探测器最佳工作状态下的接收灵敏度研究. 红外与激光技术, 1990, 24 (3): 34 ~ 44

# Performance Analysis and Design for Receiving and Transmitting Terminals of A Free-space Laser Communication System

Li Xian Zeng Guangrong Xu Min

(Institute of Applied Physics UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, the functions and fundamental structure of atmospheric laser communication system are discussed. The features and performances of laser sources and detectors—the core components of the system are presented. Commonly, the laser communication systems with the functions of ATP are practiced by separating the signal beam and the beacon beam. The characteristics of the available detectors—CCD, PSD, 4Q-PIN, 4Q-APD are analyzed. The selecting rules are mainly the receiving FOV, sensitivity and position resolution.

**Key words** laser communication system; receiving and transmitting terminals; laser sources; detectors