文章编号：1002-2082(2009)06-1051-05

# 大视场激光接收机设计

陈胜石，欧秋晔，高　玮，杜高社，纪　明，卜英华，何玉兰
（西安应用光学研究所，陕西 西安 710065）

**摘　要**：介绍激光指令制导和激光驾束制导的大视场激光接收机的设计原理，给出接收光场的数学模型，由斜入射平行光的衍射光场推出探测光学系统的视场角公式，根据1 064 nm大视场激光接收机技术要求，以聚光物镜型探测光学系统为例，探讨接收光学系统既须具备特大相对孔径，又须具备无晕接收性能的设计特点，采用窄带干涉滤光镜进行光学滤波降噪。给出一种适用于高重频（200 kHz）工作的低噪声放大器的设计实例，介绍了低噪声放大电路的设计原理。测试结果表明：设计的大视场激光接收机的接收视场角≥±10°，、动态范围≥40 dB，当放大器输出信号信噪比等于4时接收灵敏度$P_{min}=5.38\times10^{5}$ W。

**关键词**：激光制导；激光接收机；视场；无晕接收；低噪声放大
**中图分类号**：TN249　　**文献标志码**：A

## Design of laser receiver with wide FOV

CHEN Sheng-shi, OU Qiu-ye, GAO Wei, DU Gao-she, JI Ming, BU Ying-hua, HE Yu-lan
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract**: The design principle of the laser receiver with wide FOV for the laser command guidance and laser-beam riding guidance is introduced. A mathematic model of receiving light field is presented. The formula for the viewing angle of the detecting optical system was derived according to the diffraction light field of the oblique incidence parallel light. Taking a detecting optical system with the collecting objective for example, the design characteristic that the receiving optical system needs not only an extra large relative aperture but also an unvignetting receiving performance is discussed on the premise of meeting the requirement of 1 064 nm WFOV laser receiver. A narrow band interference filter was adopted to realize the noise reduction. A design example of a low noise amplifier suitable to the high-repetition-rate (200 kHz) is given. The design principle of the low noise amplification circuit is introduced. The tested results of receiving FOV angle, dynamic range and receiving sensitivity of the laser receiver with wide FOV are provided.

**Key words**: laser guidance; laser receiver; field of view; unvignetting receiving; low noise amplification

## 引言

在激光指令制导和激光驾束制导中，激光接收机装置在导弹的尾部，它由滤光片、透镜、光电探测器和前置放大器组成，其作用是接收地面控制系统激光发射机发射的激光编码信号。由于导弹对各部件体积、重量有严格限制，激光接收机为了尽可能

**收稿日期**：2009-04-02；　**修回日期**：2009-09-18
**作者简介**：陈胜石(1963－)，男，陕西周至人，工学博士，西安应用光学研究所高级工程师，主要从事激光制导研究工作。
E-mail：css.chshsh@163.com

增大其接收视场,要求探测光学系统的焦距短,探测器的面积大;另一方面,为了提高其接收的激光功率,要求物镜接收口径不能太小。因此,探测光学系统应具有很大的相对孔径。但在光学设计上,相对孔径越大则成像质量越差。所以,欲设计一个具有特大相对孔径且无渐晕的光电探测系统是非常困难的。另外,由于视场角增大,背景噪声增强,还需要采用滤波法和低噪声前置放大器等技术才能设计出合格的激光接收机。本文介绍一种接收1 064 nm 激光的大视场激光接收机的设计技术特点。

## 1 接收光场模型

直接探测激光接收机由光接收天线、光电探测器、检测处理电路3个基本模块组成。接收机天线将输入光场收集并汇聚到光电探测器表面,光电探测器进行光电转换。激光接收机成像的几何图形如图1所示。

图中 $f_c$ 为焦距, $A$ 为透镜面积。发射机被认为是一个点源,发射功率为 $P_t$,发射天线增益为 $G_a$,距接收机距离为 $L$,在透镜 $A$ 面上收集的光功率为[1]

$$P_r = \frac{G_a P_t}{4\pi L^2} A \tag{1}$$

放置在光阑平面上的接收透镜把接收到的光场聚焦到探测器所在的焦平面上,在焦平面上产生的光场称为衍射光场。

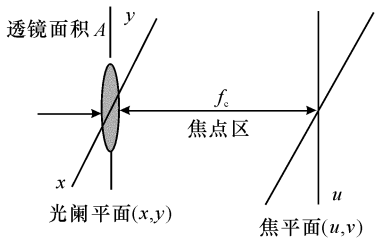


**图1 激光接收机成像的几何图形**

**Fig. 1 Geometric drawing for imaging of laser receiver**

令 $f_r(t,r)$ 为整个透镜光阑上的接收场,$f_d(t,u,v)$ 为焦平面上的衍射场,则二者由下式相联系:

$$f_d(t,u,v) = \frac{\Gamma(u,v)}{\lambda f_c}\int_A f_r(t,x,y)\exp\left[-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda f_c}(xu+yv)\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{2}$$

式中

$$\Gamma(u,v) = \frac{1}{\mathrm{j}}\exp\left[\mathrm{j}\frac{\pi}{\lambda f_c}(u^2+v^2)\right] \tag{3}$$

为相因子;$(x,y)$ 为光阑平面上的场坐标;$(u,v)$ 是焦平面上的场坐标。式(2)描述了接收场和焦平面上的场之间的关系。还应注意 $f_d(t,u,v)$ 与 $f_r(t,x,y)$ 的二维 Fourier 变换相联系,即定义

$$F_r(t,\omega_1,\omega_2) = \int_A f_r(t,x,y)\exp[-\mathrm{j}(x\omega_1 + y\omega_2)]\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{4}$$

为 $f_r(t,x,y)$ 的二维 Fourier 变换,则有

$$f_d(t,u,v) = \frac{\Gamma(u,v)}{\lambda f_c} F_r\left(t,\frac{2\pi u}{\lambda f_c},\frac{2\pi v}{\lambda f_c}\right) \tag{5}$$

这样,激光接收机内的衍射图案就可以简单地借助变换理论得到。

### 1.1 单色平面波垂直入射到接收平面上的情况

在无线激光通信中,发射激光经过发射光学系统后,可用有限平面波近似,故接收到的光场为

$$f_r(t,x,y) = \begin{cases} a(t)\exp(\mathrm{j}\omega_0 t) & (x,y)\in A \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

焦平面上得到的衍射图案可直接由下式得出:

$$f_d(t,u,v) = a(t)\exp(\mathrm{j}\omega_0 t)\Gamma(u,v) f_{d0}(u,v) \tag{7}$$

式中,$f_{d0}(u,v)$ 为空间积分,即

$$f_{d0}(u,v) = \frac{1}{\lambda f_c}\int_A \exp\left[-\mathrm{j}\left(\frac{2\pi}{\lambda f_c}\right)(xu+yv)\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{8}$$

衍射图案简化为随时间变化的包络函数、相因子 $\Gamma(u,v)$ 定义的空间函数、以及二维变换 $f_{d0}(u,v)$ 的乘积,这样垂直入射平面波产生的焦平面上的场分布可以通过式(7)中的积分给出。这个积分依赖于接收机光阑区域 $A$ 的形状。

### 1.2 圆形光阑透镜

激光接收机采用的是一个直径为 $d$ 的圆形透镜,则式(8)的变换可以转换到极坐标下进行,有:

$$f_{d0}(u,v) = \left(\frac{1}{\lambda f_c}\right)2\pi\int_0^{d/2} r\mathrm{J}_0\left(\frac{\pi r\rho}{\lambda f_c}\right)\mathrm{d}r = \left(\frac{\pi d^2/4}{\lambda f_c}\right)\left[\frac{2\mathrm{J}_1(\pi d\rho/\lambda f_c)}{(\pi d\rho/\lambda f_c)}\right] \tag{9}$$

式中:$\rho = (u^2+v^2)^{1/2}$;$\mathrm{J}_0(x)$ 和 $\mathrm{J}_1(x)$ 为 Bessel 函数。衍射场是爱里斑图样。

### 1.3 平面波在到达接收机时偏离垂直入射方向的情况

波矢为**k**,平面波偏离垂直入射方向,此时接

收机透镜上的接收光场由下式描述:

$$f_r(t,x,y)=a(t)\exp(\mathrm{j}\omega_0 t)\exp(-\mathrm{j}\mathbf{k}\cdot r)=a(t)\exp(\mathrm{j}\omega_0 t)\exp[-\mathrm{j}(x\boldsymbol{k}_x+y\boldsymbol{k}_y)] \tag{10}$$

式中:$r=(x,y)$为光阑平面上的场坐标;$\mathbf{k}_x$和$\mathbf{k}_y$分别为$\mathbf{k}$的$x$和$y$分量。用小角度近似,可以写出$\mathbf{k}_x=(2\pi/\lambda)\theta_x$,$\mathbf{k}_y=(2\pi/\lambda)\theta_y$。这里,$(\theta_x,\theta_y)$为波矢$\mathbf{k}$相对于垂直入射方向的偏离角,如图2所示。此时的

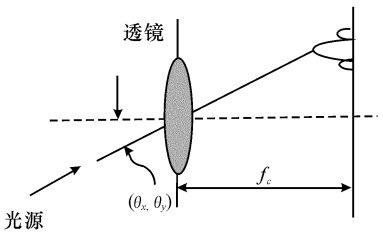


**图2　偏离垂直入射时的成像**

**Fig. 2　Imaging of drifting off vertical incidence**

空间衍射图样为

$$f_d(t,u,v)=a(t)\exp(\mathrm{j}\omega_0 t)\left(\frac{\Gamma(u,v)}{\lambda f_c}\right)\int_A\exp\left[-\mathrm{j}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(x\theta_x+y\theta_y)\right]\exp\left[-\mathrm{j}\left(\frac{2\pi}{\lambda f_c}\right)(xu+yv)\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y=a(t)\exp(\mathrm{j}\omega_0 t)\Gamma(u,v)f_{do}(u+u_0,v+v_0) \tag{11}$$

式中:$f_{d0}(u,v)$由(8)式给出;$u_0=f_c\theta_x$;$v_0=f_c\theta_y$。这样,入射平面波的角偏离使得衍射斑在焦平面上发生移位。移位后图样的位置可以由平面波的入射方向通过透镜光阑中心的延长线与焦平面的交点来确定。

### 1.4　接收视场

在焦距为$f_c$、面积为$A$的圆形透镜的焦平面上放置一直径为$d$的圆形探测器,根据图2中关于入射角和爱里图样移位的关系,可以清楚地看到成像在探测器表面(忽略边缘效应)的光场入射角只能落到下述立体角内:

$$\Omega_{fv}=\frac{\pi}{4}\left(\frac{d}{f_c}\right)^2=\frac{A_d}{f_c^2} \tag{12}$$

式中$A_d$是探测器面积。

参数$\Omega_{fv}$定义了能够被探测器表面观察到的光场入射角,它定义了将有多大的入射光场实际上被检测到,称为接收机视场,如图3所示。最小接收机视场受接收机光场制约,称为衍射极限视场,可表示为

$$\Omega_{dl}=\frac{(\lambda f_c)^2/A}{f_c^2}=\frac{\lambda^2}{A} \tag{13}$$

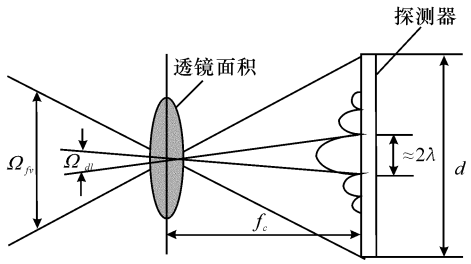


**图3　接收机视场与透镜和探测器面积的关系**

**Fig. 3　FOV of receiver versus areas of lens and detector**

由(13)式可见,衍射极限视场与接收机透镜光阑面积有关。实际上把检测器的面积做到等于衍射极限场非常困难,接收视场一般比其他衍射极限角要大许多倍。

## 2　激光接收机光学系统设计特点

### 2.1　探测光学系统的技术要求

探测光学系统除了对外形尺寸和工作距离有要求外,主要是对接收视场角度和接收辐射能量有要求,实现无晕接收。探测系统的设计指标为

激光波长:1.064 μm;

接收入瞳有效直径:φ30 mm;

轴向尺寸:≤48 mm;

工作距离:≥3 mm;

接收视场角:±10°;

光学系统透过率:≥70%;

光电探测器光敏直径:φ6 mm。

通常光学系统就相对孔径而言分为[2]:相对孔径1/9～1/18为弱光系统,相对孔径1/3.5～1/9为普通型光学系统,相对孔径1/1.4～1/3.5为强光光学系统;超强光光学系统的相对孔径则在1/1.4以上。为了满足探测系统的性能,激光接收机光学系统的相对孔径必须为超强光学类型。

### 2.2　探测光学系统设计

在设计探测光学系统时,必须重视对其构型的分析比较及选择。可以用于探测器接收光学系统的型式是多种多样的[3],如聚光物镜接收、聚光物镜与场镜组合、聚光浸没透镜型、自聚焦透镜型及光锥积分器等。在无晕接收的的前提条件下,围绕光学系统既能聚集多的辐射能量,又能令其均匀分

布,从而进行多种因素的分析研究。从外形尺寸合理、结构简单、工作距离长等诸多方面考虑,聚光物镜型可作为众多方案中的首选方案,如图4所示。图4中,1为干涉滤光镜;2为第一单正透镜;3为双胶合透镜;4为第二单正透镜;5为光电二极管。

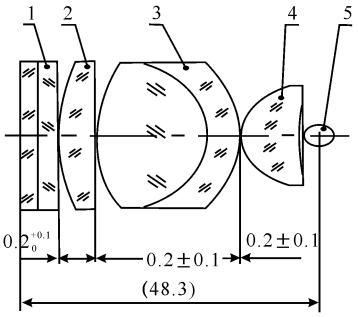


**图4　聚光物镜型探测光学系统**

**Fig. 4　Detecting optical system with collecting objective**

光电探测光学系统遵循$y'=f'\cdot\tan\omega$这一公式(其中$y'$为像高,$f'$为焦距,$\omega$为半视场角)。如果选用$\Phi6$的光电探测器以及$\omega=10°$的半视场角,则$f'=17.01$ mm。由于该系统为超强光系统,显然轴外光的全部光线落在像面之外而不被接收。由此可知,该系统渐晕相当严重。

通过实际设计探索,笔者找到了解决问题的有效方法,即缩焦法。就是将系统的焦距$f'$逐次缩小到一个适当的数值,须指出的是并非将$f'$缩得越小越好,因为当$f'$减小时,通光口径不变,则相对孔径就增大。这样,轴外像差就无法控制,同样会导致严重的渐晕,所以必须进行优化缩焦。

2.2.1　光学系统各组元光焦度分配

本文设计的系统焦距$f'=15.2$ mm。在系统的$f'$确定后,可确定系统的相对孔径,即$D/f'=1/0.51$。因采用简单的结构难以实现接收性能,我们选用三组元密接结构形式。为了消除全反射,校正像差,必须对光学系统各组元光焦度合理分配。开始时可设计一组光焦度$\Psi_1$、$\Psi_2$、$\Psi_3$数值,计算轴上、轴外光在各组元上的高度$h_1$和$h_p$值。由于$h_1$和$h_p$值均较大,可将$\Psi_1$逐次减小,使第一组元有一个合适的相对孔径,然后将$\Psi_2$、$\Psi_3$对比修改,使第二、三组元的相对孔径适中,从而获得了$\Psi_1$、$\Psi_2$、$\Psi_3$取值的变化范围。以下是$\Psi_1$、$\Psi_2$、$\Psi_3$分配域值的最佳范围:

$$\begin{cases}\Psi_1+\Psi_2+\Psi_3=1\\0.15<\Psi_1<0.2\\0.2<\Psi_2<0.35\end{cases}$$

以上这些条件对设计探测光学系统是非常重要的,依据这些条件对系统各组元进行光焦度分配,最终可获得系统中透镜表面合理的弯曲,避免锐曲率的发生,从而使轴上、轴外光在系统中透镜面上的偏角$i$、$i'$和$i_p$、$i_p'$得到控制。这是消除全反射的有效途径之一。

2.2.2　双胶合透镜的设置及定位

为了有效控制轴外宽光束,系统须具备校正像差的能力。用几组单正透镜的形式显然是不行的,须引入一组双胶合组元。双胶合透镜在系统中所处的位置相当重要,若将它设置在第一组元位置,因$\Psi_1$较小,轴外光束收敛速度很慢,对改善系统轴外像差作用不大;将第二、三组元相对孔径相比较,第二组元具有较大的相对孔径,所以将双胶合透镜置于中间位置。合理的定位使它在系统相差校正中发挥极大的作用,这也是防止全反射发生的重要手段。

2.2.3　曲率锐度判别

在普通型相对孔径的光学系统中,几乎不可能发生全反射现象,只有在特大相对孔径的超强光系统中才有可能产生。曲率锐度判别法则是解决这一难题的关键所在。在实际光线追迹时,对系统所有面形的弯曲锐度进行判别,即用轴上、轴外光在各面上的$i$、$i_p$角的大小进行比较,分析它们在像差校正中的灵敏度及相互间的制约程度,经判别后对可以产生全反射界面的曲率进行修改。另外,还要考虑透镜的弯曲方向,如将第5面向物方弯曲,第7面向像方弯曲,将该面上的$i$、$i_p$角控制在要求的范围之内即可消除全反射。

### 2.3　提高输入信噪比的光学方法

对直接探测系统来说,提高输入信噪比是十分重要的。首先,尽可能减少杂散光和背景光进入探测系统,就能有效提高输入信噪比。这就是光谱滤波法,它基于激光发射波长与背景辐射波长之间的差别,利用光谱滤光法消除背景辐射的干扰。文中采用窄带干涉滤光镜来提高输入信噪比,其设计技术要求为:

$\lambda_0=1\ 064$ nm,$\Delta\lambda_0=\pm3$ nm,半带宽$\leqslant(28\pm2)$nm,峰值透过率$\tau\geqslant80\%$。

## 3　激光接收机光电探测放大器设计特点

探测放大器由PIN探测器、探测器偏置电路、低噪声前置放大器、主放大器和整形电路组成,具

体电路如图5所示。

### 3.1 光电探测器的合理选择及其偏置电路设置

系统采用直接探测方式,所接收激光的中心波长为1 064 nm,频率高达200 kHz。由于接收视场较大(±10°),须选择光敏面大的光电探测器。为了提高探测灵敏度,选择光敏面大(Φ6 mm)的InGaAsPIN光电探测器。光电二极管反偏置电路由$V_1$、$R_1$、$C_1$组成,$R_1$为光电二极管的负载电阻,并为前置放大器提供信号(负脉冲形式),$C_1$是耦合电容,这种接法使前置放大器的输入端对地的分布电容比较小,非常适用于对高重频激光脉冲的接收。

### 3.2 放大与整形电路

光电探测器的后随放大器除了前置放大级外,由于放大量不够而采用多级放大器。多级放大器的总等效输入噪声主要决定于源电阻噪声和第一级放大器的噪声,随着以后级数的增加,各级噪声贡献逐渐减小[4]。由三极管$V_2$和电阻$R_2$~$R_7$组成无噪声偏置共射电压放大器,它是低噪声放大器的输入级,是一个简单实用的低噪声前置放大器电路。另外,由$V_3$、$D_1$、$V_4$、$V_5$构成多级主放大器,具有很高的电压增益。

由$C_{17}$、$R_{21}$、$R_{22}$、$V_8$组成负沿触发门限电路,由$V_6$、$V_7$组成单稳触发电路,起脉冲整形作用。

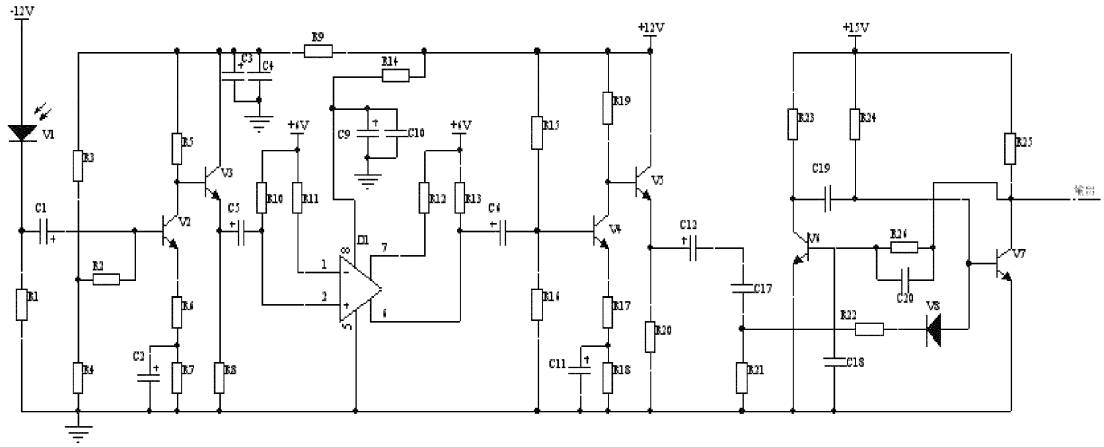


**图5 探测放大器原理图**

**Fig. 5 Principle diagram of detecting amplifier**

## 4 结束语

激光接收机由滤光的大相对孔径镜组、光电探测器、电信号放大器和整形电路组成。在设计大视场探测光学系统时,首先应从选择结构形式入手,还应注意光焦度分配、全反射消除等问题。在电信号放大器设计中,应注意低噪声前置放大级的设计。通过以上设计考虑,并经过实际试验,本文设计的激光接收机性能指标测试值为

光学系统透过率:71%

系统灵敏度:当放大器输出信号信噪比等于4时,$P_{min}=5.38\times10^{-5}$ W;

动态范围:≥40 dB;

接收视场角:≥±10°。

**参考文献:**

[1] 安毓英,曾晓东.光电探测原理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
AN Yu-ying, ZENG Xiao-dong. The theory of photo-electronic detecting[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)

[2] 刘肖民.光电探测光学系统无晕接收特性的研究[J].应用光学,1999,20(5):5-7.
LIU Xiao-min. The study of non-vignetting receiving features of optical system for electro-optic detecting [J]. Journal of Applied Optics, 1999,20(5):5-7. (in Chinese with an English abstract)

[3] 刘肖民.超强光探测光学系统设计探讨[J].应用光学,1995,16(1):5-8.
LIU Xiao-min. Approach to the design of optical system for ultrahigh-light detection[J]. Journal of Applied Optics, 1995,16(1):5-8. (in Chinese with an English abstract)

[4] 胡士凌,孔得人.光电电子线路[M].北京:北京理工大学出版社,1996.
HU Shi-ling, KONG De-ren. Photo-electronic electronic circuit [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)