

文章编号: 0258-7025(2009)08-2030-05

自由空间激光通信四象限探测器性能研究

韩 成^{1,2} 白宝兴¹ 杨华民^{1,2} 佟首峰² 姜会林² 范静涛^{1,2}

(¹长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022
²长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 在自由空间激光通信中,精跟踪单元的探测器经常选用四象限探测器(QD),探测器的性能影响跟踪精度。为了研究四象限探测器在不同条件下的性能,提出变步长的方法,分析光斑大小对动态范围和探测灵敏度的影响情况,在满足仿真精度的前提下,缩短了仿真时间。在光斑能量服从高斯分布的情况下,分析背景光、光电响应度和死区对动态范围和探测灵敏度的影响,特别研究非均匀背景光的影响。结果表明,随着光斑半径的增加,光斑位置检测的动态范围在增大,位置探测灵敏度在降低。相同光斑半径条件下,对于服从艾里分布的光斑的位置探测灵敏度高于服从高斯分布的光斑,而动态范围小于后者,非均匀背景光对探测器性能的影响比均匀背景的影响大。

关键词 光通信;自由空间光通信;四象限探测器;仿真;背景光;动态范围;探测灵敏度

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2030

Study Four-Quadrant Detector in the Free Space Laser Communication

Han Cheng^{1,2} Bai Baoxing¹ Yang Huamin^{1,2} Tong Shoufeng²
Jiang Huilin² Fan Jingtao^{1,2}

¹School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Key Laboratory of Technology of Photo-Electronic Measure-control and Laser Transfers, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Four-quadrant detector (QD) is used for detector of extract track in free space optical communication, and influences tracking precision. The method of the variable step-size is given, and the influences of the facular size to the dynamic range and the detection sensitivity are analyzed. As the simulation precision is satisfied, simulation time is shortened. On the condition that the facular energy obeys the Gauss distribution, the influences of the background light, responsibility and dead-area to the dynamic range and the detection sensitivity are analyzed, especially the influence of the non-uniformity background light is analyzed. The result indicates that the dynamic range of facular position detection is increased, and detection sensitivity is reduced with the increase of the facular size. On the condition of the same facular size, the detection sensitivity as to obey Airy distribution is higher than Gauss distribution, the influence of non-uniformity to the detector is larger than uniformity.

Key words optical communications; free space optical communications; four-quadrant detector; simulation; background light; dynamic range; detection sensitivity

1 引 言

自由空间激光通信系统中的 APT(Acquisition

Pointing Tracking)系统由精跟踪系统、粗跟踪系统和 APT 控制系统组成。其中精跟踪系统对于光束偏转

收稿日期: 2008-08-08; 收到修改稿日期: 2008-12-11

作者简介: 韩 成(1978—),男,博士研究生,主要从事自由空间激光通信捕获系统和系统仿真方面的研究。

E-mail: hancheng0626@hotmail.com

导师简介: 白宝兴(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事无损检测与在线检测技术方面的研究。

E-mail: bxbai@cust.edu.cn

角的检测精度和检测速度决定着精跟踪系统的跟踪精度和跟踪速度。而光束偏转角的检测实际上等效于光斑在精跟踪探测器象敏面上位置的检测,常用的光斑位置检测的探测器有位置敏感探测器(PSD)、四象限器件(QD)、电荷耦合器件(CCD)等多种^[1~3]。

为了减少大气环境因素的影响,自由空间激光通信系统中采用的激光波长均处在大气窗口处,即 800 nm 和 1550 nm 波段附近,目前比较典型的空间激光通信系统都选择波长在 800 nm 波段处的激光,探测器一般选用 CCD 或 QD^[4]。相对于 800 nm 波段处的激光,1550 nm 波段处的激光具有对人安全、大气环境影响小等优点,但常用的 CCD 探测器在 1550 nm 波段附近的响应灵敏度很低,不能满足高灵敏度探测的要求;同时,目前国内外 CCD 探测器的最高帧频有限,且很难购买。相对而言,QD 探测器在 1550 nm 波段工作时,仍能保持有较高的响应灵敏度,同时能够得到较高的频带宽度,并且器件比较容易获得。所以对四象限探测器的性能进行研究是非常有意义的。

目前,对于四象限探测器性能的研究都以能量服从均匀分布的光斑为研究对象^[5~7]。但在空间激光通信中,探测器上的光斑能量大多服从高斯分布^[8]或艾里分布,本文研究分析了光斑能量分布情况、光斑大小、背景光、光电响应度和死区对四象限探测器工作性能的影响情况。

2 四象限探测器工作原理

四象限光电探测器是将 4 个性能几乎完全一样的光电管按四象限分布的形式集成而成。成像光斑被 4 个象限分成 4 个部分,设面积分别为 S_a, S_b, S_c, S_d , 对应的 4 个象限产生的光电流分别为 I_a, I_b, I_c, I_d , 光斑在四象限探测器 4 个光敏面上的光功率分别为 E_a, E_b, E_c, E_d 。当光斑在四象限探测器上移动时,各象限受光面积将发生变化,从而引起四个象限产生的电流强度变化。假设光斑能量服从均匀分布,四个象限的相应度一致,那么光斑质心在横轴和纵轴方向的偏移量可表示为^[5]。

$$d_x = \frac{(E_a + E_d) - (E_b + E_c)}{E_a + E_d + E_b + E_c} = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{I_a + I_d + I_b + I_c} = \frac{(S_a + S_d) - (S_b + S_c)}{S_a + S_d + S_b + S_c}, \quad (1)$$

$$d_y = \frac{(E_a + E_b) - (E_c + E_d)}{E_a + E_d + E_b + E_c} = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_d + I_b + I_c} = \frac{(S_a + S_b) - (S_c + S_d)}{S_a + S_d + S_b + S_c}. \quad (2)$$

3 光斑大小对跟踪精度的影响

在自由空间激光通信系统中,四象限探测器的光敏面上成像光斑的大小与光斑能量分布情况,都会影响跟踪精度。为了分析方便,对四象限探测器光敏面的大小进行归一化处理,设一个象限光敏面的半径为 1,死区大小为 0,光斑能量分别服从高斯和艾里分布,分析不同大小的光斑半径对跟踪精度的影响。在以上假设情况下,光斑在四象限探测器 4 个光敏面上的光功率与光斑在探测器的四个象限上所占面积不成正比,需要利用光斑的能量分布公式对面积进行加权处理,以得到与四象限探测器 4 个象限所获得的光功率成比例的光斑面积,从而计算出光斑的位置。

设将光斑分成 n 段,第 k 段光斑落在一个象限中的面积为 $s(k)$,根据光斑能量分布可以知道第 k 段光斑在一个象限的能量大小为 $p(k)$,光斑落在 b 象限的段数为 n_1 ,所以当 n 取一个较大的值时,可以根据公式

$$S_b = \sum_{k=1}^{n_1} s(k) p(k) \quad (3)$$

$$S_a = \sum_{k=n_1+1}^n s(k) p(k) \quad (4)$$

计算光斑在 a, b 象限的面积,同理可知光斑在 c, d 象限的面积。显然 n 越大,计算的误差越小,但当 n 值很大时,需要的计算量很大,有时是计算机无法忍受的,而 n 值较小时,又不能满足精度要求,所以采用变步长的方式将光斑分成 n 段,即在光斑能量比较集中的区域采用小步长,而在光斑能量较弱的区域采用大步长。由(3)式和(4)式可知, n 值越大,需要的仿真时间越长,而在满足仿真精度的前提下,适当选择 n_1 ,就可以减小 n 值,也就可以减小仿真时间。

3.1 光斑能量服从高斯分布

设光斑中心处光强为 I_0 ,则服从高斯分布的光斑光强分布 I 可表示为

$$I = I_0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

其中 μ 为均值, σ 为标准差, r 为距离光斑中心的径向距离。

以光斑中心在 X 轴上的偏移量为研究对象,设

光斑中心在 X 轴上,理想圆形光斑半径 r 分别为 0.25, 0.5, 1, 将(3)式和(4)式分别代入(1)式中,可以得到光斑中心实际位置与解算公式计算所得的光斑中心偏移量和偏移量的斜率因子之间的关系,如图 1 和图 2 所示。

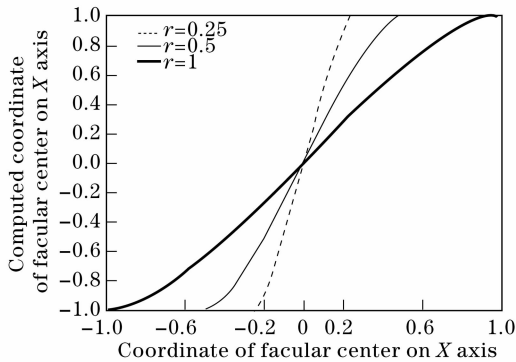


图 1 光斑中心实际位置与计算偏移量之间的关系

Fig. 1 Relation of the facular center and compute offset

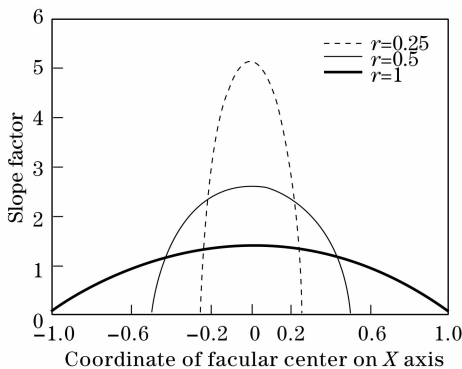


图 2 光斑中心位置与计算偏移量曲线的斜率之间的关系

Fig. 2 Relation of the facular center and the slope of the compute offset

由图 1 和图 2 可以看出,光斑中心实际位置与公式计算所得偏移量之间存在非线性关系,这种非线性随着光斑半径的增大逐渐减小。同时也可以看出,在准线性的情况下,光斑位置检测的动态范围在增大;而光斑中心实际位置与公式计算所得偏移量之间关系曲线的斜率最大值在不断减小,即位置探测灵敏度在降低。

3.2 光斑能量服从艾里分布

理想光学系统在像面上所成星点像的光强分布 I 是光瞳面上复振幅分布函数的傅氏变换模的平方。在圆形光瞳的情况下,光强分布函数即艾里斑分布为

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(V)}{V} \right]^2, \quad (6)$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f} \right) \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (7)$$

式中 I_0 为被测系统所成星点衍射像的中央处光强; J_1 为一阶贝塞耳函数; f 为被测系统焦距; a 为被测系统光瞳半径。

同样以光斑在 X 轴上的偏移量为研究对象,设光斑中心在 X 轴上,理想圆形光斑半径 r 分别为 0.25, 0.5, 1, 计算光斑中心实际位置与光斑偏移量解算公式计算所得的光斑偏移量和偏移量斜率之间的关系,如图 3 和图 4 所示。从图中可知,在准线性的情况下,光斑位置检测的动态范围在增大;而光斑中心实际位置与公式计算所得偏移量之间关系曲线的斜率最大值在不断减小,即位置探测灵敏度在降低。通过与图 1 和图 2 的比较发现,相同光斑半径条件下,四象限探测器对于服从艾里分布的光斑的位置探测灵敏度高于服从高斯分布的光斑,而动态范围小于后者。

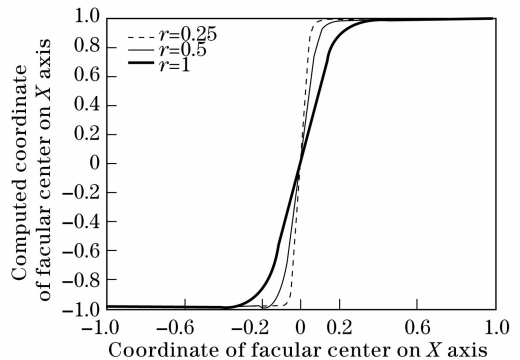


图 3 光斑中心与计算偏移量之间的关系

Fig. 3 Relation of the facular center and compute offset

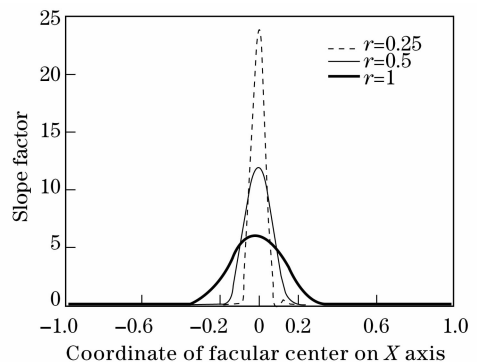


图 4 光斑中心与计算偏移量曲线的斜率之间的关系

Fig. 4 Relation of the facular center and the slope of the compute offset

4 背景光和光电响应度对跟踪精度的影响

4.1 背景光对跟踪精度的影响

在自由空间激光通信系统中,背景光是影响跟踪

精度的因素之一。背景光主要包括点目标干扰源和面目标干扰源两类,其中点目标干扰源如亮度非常大的金星和天狼星,对激光通信系统影响非常大,但是干扰几率较小,可以忽略;面干扰源如太阳、地球漫反射及各种因素引起的天空背景光,对于太阳干扰源,即使加窄带滤光片,由太阳光引起的背景光的功率仍远远大于通信光的功率,所以激光通信应避免太阳光的干扰^[9]。

如果四象限探测器光敏面上背景光为对称分布,将会使探测器上总能量增加,而探测器两侧光斑能量差不变,这就使通过偏移量解算公式所得的光斑中心位置与光斑中心的实际位置出现偏差,从而降低了光斑位置检测精度。设四象限探测器上的光斑为理想圆形光斑,光斑能量服从高斯分布,探测器半径经过归一化处理,光斑半径为 0.5,背景光能量与光斑总能量的比值为 R ,当 R 分别为 0.05, 0.15 和 0.25 倍时,光斑中心实际位置和公式解算所得的光斑中心位置的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着背景光的增强,光斑中心实际位置与偏移量解算公式解算所得的光斑位置之间的线性范围在减小,且光斑实际位置与公式解算偏移量之间的关系曲线的斜率在降低,因此,降低了光斑位置探测灵敏度。

如果背景光在探测器上能量分布不均匀,设在探测器 X 轴负半轴上的背景光能量与正半轴背景光能量比为 t ,当 t 分别为 2, 4, 6 时,光斑中心实际位置与公式解算光斑中心位置之间的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,3 条曲线都不经过原点,随 t 的增大,公式计算所得的光斑位置误差在增大,光斑位置检测的动态范围在减小,而探测灵敏度在增加。通过分析可知,背景光对跟踪精度有很大的影响,必须进行有效抑制,通常可以通过加窄带滤光片的方式减小背景光带来的干扰;另外还可以通过数字信号处理的

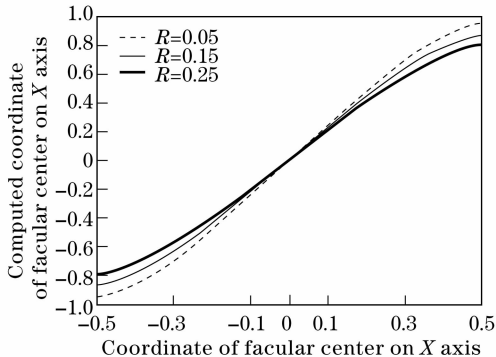


图 5 均匀背景光条件下光斑中心与计算偏移量之间的关系
Fig. 5 Relation of the facular center and compute offset with even-backlight

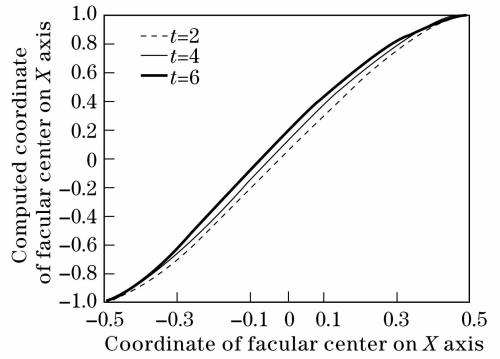


图 6 不均匀背景光条件下光斑中心与计算偏移量之间的关系
Fig. 6 Relation of the facular center and compute offset with uneven-backlight

方式来进一步减小这种影响。

4.2 光电响应度对跟踪精度的影响

在四象限光电探测器中,探测器 4 个象限的光电响应度是一个很重要的指标,它将直接影响四象限光电探测器的探测灵敏度和动态范围。同样以光斑中心在 X 轴上的偏移量为研究对象,设光斑中心在 X 轴上,理想圆形光斑半径为 0.5,位于探测器左边两个象限的光电响应度为 d ,当 d 分别为 0.7, 0.8, 0.9 时,其他两个象限的光电响应度为 1,可以得到光斑中心实际位置和公式解算所得的光斑中心位置的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,3 条曲线都不经过原点,随 d 的增大,公式计算所得的光斑位置误差在减小,光斑位置检测的动态范围在减小,而探测灵敏度在增加。

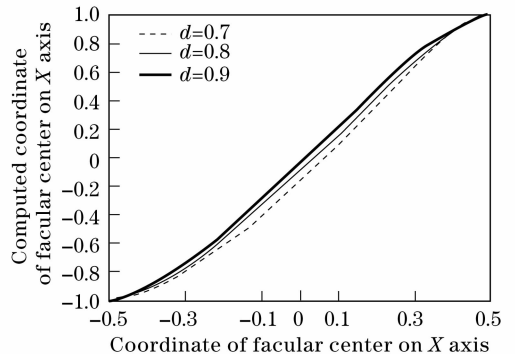


图 7 不同光电响应度下光斑中心与计算偏移量之间的关系
Fig. 7 Relation of the facular center and compute offset with different responsivity

5 死区对跟踪精度的影响

由于四象限探测器是由 4 个性能几乎完全一样的光电管集成而来,为了减小 4 个光电管之间的相互串扰,必须适当隔离,隔离区通常不会对光信号产

生响应,即死区。死区会减少光敏面上光斑总能量和象限间的能量差,从而影响探测器的动态范围和探测灵敏度。设四象限探测器上的光斑为理想圆形光斑,光斑能量服从高斯分布,不考虑背景光,探测器半径经过归一化处理,光斑半径为 0.5,死区半径为探测器光敏面半径的百分之一。可以得到光斑实际位置与光斑偏移量解算公式计算所得的光斑偏移量之间的关系如图 8。为了观察方便,将图 8 进行了局部放大得到了图 9,从图 9 中可知,在光斑大小一定的情况下,有死区的四象限探测器的动态范围比没有死区的小,同时,在靠近原点部分,四象限探测器的位置探测灵敏度明显减弱。

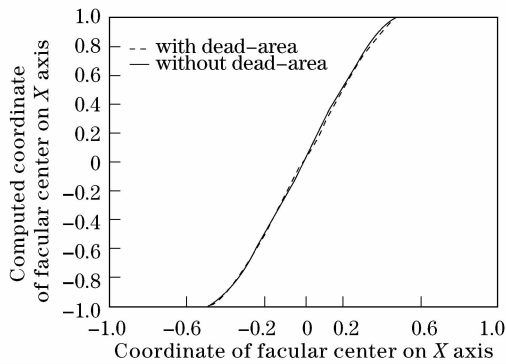


图 8 光斑中心实际位置与计算偏移量之间的关系

Fig. 8 Relation of the facular center and compute offset

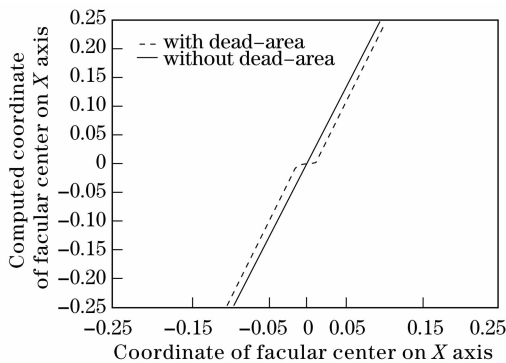


图 9 图 8 的局部放大图

Fig. 9 Amplificatory figure of Fig. 8

6 结 论

四象限探测器仿真系统,在光斑能量分布服从高斯分布和艾里分布的两种情况下,分析了能量分布情况和光斑半径对光斑检测精度的影响,同时分析研究了背景光、死区对跟踪精度的影响,特别分析了不均匀背景光对跟踪精度的影响。

分析结果表明,光斑位置检测的动态范围随着探测器光敏面上的光斑半径的增加而增大,位置探测灵敏度随着探测器光敏面上的光斑半径的增加而降低。在其他条件相同的情况下,对于服从艾里分布的光斑的位置探测灵敏度高于服从高斯分布的光斑,而动态范围小于后者,非均匀背景光对探测器性能的影响比均匀背景的影响大,有死区的四象限探测器的动态范围比没有死区的小,同时,在靠近原点部分,四象限探测器的位置探测灵敏度明显减弱。

参 考 文 献

- 1 Rajul P. Mathur, Christopher I. Beard, David J. Purll. Analysis of SILEX tracking sensor performance[C]. *SPIE*, 1990, **1218**: 129~141
- 2 Fu Yuegang, Liu Zhi, Zhang Lei *et al.*. Performance analysing and comparing for four tracking detectors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **26**(Suppl.): 136~138
付跃刚, 刘智, 张磊等. 四种用于跟踪的探测器比较与分析[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(增刊): 136~138
- 3 Yu Siyuan, Han Qiqi, Ma Jing *et al.*. Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 67~71
于思源, 韩琦琦, 马晶等. 卫星光通信终端 CCD 成像光斑弥散圆尺寸选择[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 67~71
- 4 Zhang Ruijun. Current situation and development trend of optical detector in space optical communication [J]. *Photonics Technology*, 2005, **6**(2): 4~8
张瑞君. 空间光通信用光探测器及其发展现状与趋势[J]. *光子技术*, 2005, **6**(2): 4~8
- 5 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Liu Bin. Study on background light influences on four-quadrant detector [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 493~495
匡萃方, 冯其波, 刘斌. 背景光对四象限探测器干扰的研究[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(6): 493~495
- 6 Zhang Wentao, Li Xian, Hu Yu. Research of quadrant detector (QD) in optical communication technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(1): 114~116
张文涛, 李贤, 胡渝. 空间光通信探测技术中像限探测器(QD)的研究[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(1): 114~116
- 7 Zhang Zhifeng, Kuang Cuifang, Chen Shiqian. Study of relation between facula and size of quadrant of quadrant detector [J]. *Measurement Technique, Measuring and Equipment*, 2005, **11**: 29~31
张志峰, 匡萃方, 陈世谦. 像光斑和四象限探测器像限面积大小关系的理论研究[J]. *计量技术, 测量与设备*, 2005, **11**: 29~31
- 8 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 499~502
丁涛, 许国良, 张旭苹等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 499~502
- 9 Tong Shoufeng, Liu Yunqing, Jiang Huilin. Power analysis of APT coarse tracking link of free space laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 322~350
佟首峰, 刘云清, 姜会林. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪链路功率分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(3): 322~350