

文章编号: 1002-2082(2008)04-0508-04

# 外差探测系统中马卡望远镜离轴使用的研究

毛红敏, 徐 静, 甄胜来, 马玉芬, 俞本立

(安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘要:** 鉴于马卡望远镜离轴能够减小因副镜遮挡引起的光能量损失, 分析了马卡望远镜离轴使用时, 合作目标和非合作目标发射和接收光路的区别。讨论了马卡望远镜在外差探测系统离轴使用时, 发射能量提高, 但外差效率下降的原因; 在合作目标外差探测系统离轴使用时发射能量提高30%以上, 外差效率也有很大提高; 通过对散射体目标物和平面镜的测量, 分别得到了17%和85%的外差效率, 验证了马卡望远镜在合作目标外差探测系统中可以离轴使用。

**关键词:** 外差探测; 马卡望远镜; 离轴; 外差效率

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

## Off-axis use of Cassegrain telescope in heterodyne detection system

MAO Hong-min, XU Jing, ZHEN Sheng-lai, MA Yu-fen, YU Ben-li

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation

Sponsored by Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** The effect of off-axis use of Cassegrain telescope with different objectives on heterodyne detection probability is studied. In the non-cooperative target heterodyne detection system, when light is off-axially emitted from Cassegrain telescope, the emitted energy is increased while detection probability is declined. In cooperation target heterodyne detection system, the emitted energy is increased by 30%, detection probability is also increased greatly. The detection probabilities for the scattering object and mirror measured at laboratory are 17% and 85% respectively. It verifies that off-axis Cassegrain telescope can be used for achieving better performance in cooperation target heterodyne detection system.

**Key words:** heterodyne detection; Cassegrain telescope; off-axis; heterodyne detection probability

## 引言

外差探测因为具有高的灵敏度和探测微弱信号的能力, 在激光测距和红外探测等方面广泛应用<sup>[1]</sup>。对于长距离的外差探测系统, 接收到的信号常常很弱, 需要借助于光学天线来发射和接收激光, 从而提高探测信号的能量。光学天线使用的望

远镜主要有透射式、反射式和折反式3大类。折反式马卡望远镜因其焦距长、体积小、质量轻、制作相对折射系统容易, 且强激光对反射镜损坏小等特点, 经常在外差探测系统中使用。但是马卡望远镜也存在自身的缺陷, 由于中心副镜的遮挡, 对收发共路光学系统发射光能量的损失在30%以上, 而对

收稿日期: 2007-12-10; 修回日期: 2008-01-17

基金项目: 安徽省优秀青年科技基金(04042045); 安徽省高校青年教师科研“资助计划”基金(2005jq1027)

作者简介: 毛红敏(1976—), 女, 河北邢台人, 博士生, 主要研究方向为激光测量系统的光学设计、加工、检验和分析。

E-mail: hongminmao@ahu.edu.cn

于优化的高斯分布激光光源, 能量损失可以达到50%甚至更多。就如何提高发射光的能量提出了很多方法, 如把两反系统改为三反系统<sup>[2-4]</sup>。但是三反系统体积大, 光路调整困难, 使用不方便。另外有人提出采用离轴发射可以减小光能的损失<sup>[5]</sup>, 但没有对各种测量原理、测量目标使用情况进行详细分析。本文基于外差探测系统, 讨论了2类不同目标情况下马卡望远镜离轴使用对外差效率的影响。

## 1 外差探测系统光束匹配理论分析

当频率为 $\omega_1$ 的信号光和频率为 $\omega_2$ 的本振光同时平行射到具有平方律特性的探测器时, 由于探测器的时间常数限制, 不能响应光频及倍频, 只对差频有响应, 在探测器上的响应<sup>[6]</sup>为

$$\eta = \beta / 2(E_1^2 + E_2^2) + \beta E_1 E_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为比例常数;  $E_1$  和  $E_2$  分别为信号光和本振光的场强。图1为外差探测原理图。

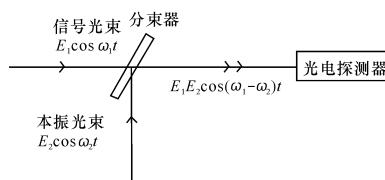


图1 外差探测原理图

Fig. 1 Principle diagram of heterodyne detection

由(1)式可知, 激光外差探测要求到达探测器表面的信号光与本振光的混频效率尽量地高, 尤其在探测远距离的微弱信号时, 对混频效率的要求更为严格。提高外差探测混频效率的基本方法是信号光与本振光在探测器表面的匹配程度, 这种匹配程度包括偏振态匹配、振幅匹配和波阵面匹配。在以上3种匹配中, 实现波阵面匹配的难度较大; 波阵面匹配要求经过光学系统到达探测器表面的信号光和本振光的光斑大小相同, 波前畸变要尽量小, 而且2束光波矢的夹角要尽量小, 即空间对准精度要高。

在有衍射现象发生的系统中, 信号光和本振光的光斑大小对外差效率的影响<sup>[7]</sup>为

$$\eta = \frac{\left[ \int_D^{\infty} \frac{J_1(x)}{x} \cdot \frac{J_1(\alpha x)}{\alpha x} dx \right]^2}{\frac{\pi}{\alpha^2} \int_D^{\infty} \left[ \frac{J_1(x)}{x} \right]^2 dx} \quad (2)$$

式中:  $\frac{J_1(x)}{x} = U_{l0}(x)$ ,  $\frac{J_1(\alpha x)}{\alpha x} = U_s(x)$  分别为本振光场和信号光场的归一化分布函数;  $J_1(x)$  为一阶 Bessel 函数;  $\alpha$  为信号光与本振光 Airy 斑尺寸的比例系数;  $x = kdr/f$ ,  $k$  为波数,  $d$  为光阑的半径,  $f$  为透镜的焦距。当比例系数  $\alpha$  在  $0.8 \sim 1.2$  范围内变化时, 选择合适的光电管尺寸, 可以获得 70% 以上的外差效率。

参考光和信号光光轴的夹角对外差效率的影响非常显著, 随着2束光光轴夹角的增大, 外差效率明显下降。理论计算表明, 2束空间光允许的最大偏差角<sup>[6]</sup>为

$$\theta_{\max} = \lambda/d \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为激光波长;  $d$  为光电探测器的混频孔径。当  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $d = 0.3 \text{ mm}$  时, 最大偏角为  $2.1 \text{ mrad}$ 。

## 2 实验装置

为了验证马卡望远镜离轴使用对外差效率的影响, 设计了图2所示的外差探测系统。其中, 激光器发出的激光波长为  $632.8 \text{ nm}$ , 望远镜口径  $D$  为  $120 \text{ mm}$ , 焦距  $f$  为  $1500 \text{ mm}$ , 光电探测器直径  $d$  为  $0.3 \text{ mm}$ 。目标物分别为镀铝膜的平面反射镜和普通铝合金片, 目标物距离望远镜为  $15 \text{ m}$ 。信号光经望远镜会聚到光电探测器表面与本振光发生混频, 光电探测器再将检测到的信号经过光电转换和放大, 最后由示波器显示混频信号图样。

外差探测系统中激光器发出的光, 经马卡望远镜离轴发射的光路如图3所示。入射光光轴和望远镜光轴偏离, 离轴量的要求是以发射光束能够不被副镜遮挡、全部发出为标准。发射光入射到副镜的侧边, 被副镜反射到主镜的侧边后从弯月镜的一侧发射出去。由于光束全部被发射, 在不考虑反射损耗的情况下, 光源能量全部被利用, 因此发射光能量提高 30% 以上。

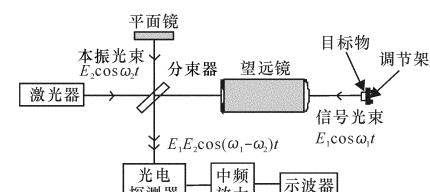


图2 外差探测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heterodyne detection system

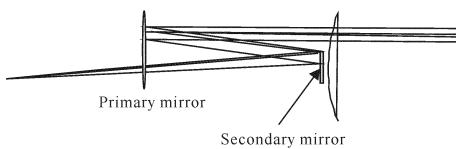


图 3 马卡望远镜离轴发射光路原理图

Fig. 3 Beam path for off-axis transmission of Cassegrain telescope

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 基于非合作目标的外差探测系统

对于非合作目标外差探测系统, 目标表面粗糙, 光入射到粗糙表面发生漫反射, 到达马卡望远镜表面的散射光充满整个镜筒, 经过弯月镜和主副镜后会聚到光电探测器。马卡望远镜接收散射光的光路原理如图 4 所示。在此系统中, 信号光的光斑和参考光的光斑大小可能不完全相同, 只要信号光和参考光在光电管上的光斑比例在 0.8~1.2 之间, 外差效率主要由参考光和信号光的夹角决定。

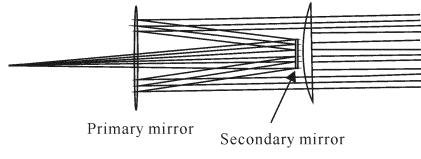


图 4 马卡望远镜接收散射光原理图

Fig. 4 Principle diagram of receiving scattered light of Cassegrain telescope

光电管上接收的是参考光和信号光的混频光波, 如图 5 所示。信号光是会聚光波, 会聚角为望远镜的孔径角  $\alpha$ , 即:

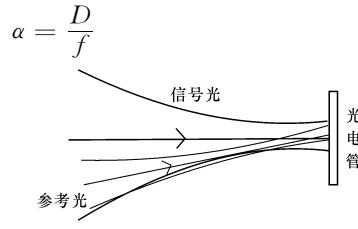


图 5 探测器表面上的参考光和信号光

Fig. 5 Reference and signal light on surface of detector 由马卡望远镜的孔径和焦距, 求得信号光波的发散角为 80 mrad。当参考光的方向确定后, 由于参考光是近似的平行光, 只能和信号光中一部分光满足外差条件, 与大部分光的夹角大于发生混频要求的最大偏角 2.1 mrad。因此, 信号光中的一部分光和

参考光发生混频, 导致外差效率低, 图 6 为普通铝合金片的外差效率, 近似为 17%。

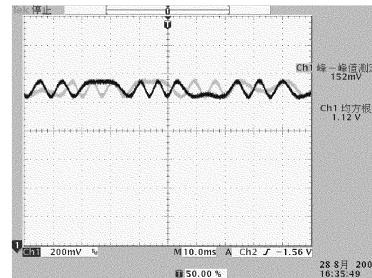


图 6 离轴外差探测系统对反射膜探测的外差效率图

Fig. 6 Interference detection efficiency of reflective film obtained by off-axis heterodyne detection system

#### 3.2 基于合作目标的外差探测系统

基于合作目标的外差探测系统常借助于平面镜来增加信号光的强度。入射到平面镜的光波被反射, 反射光沿入射光的反方向传播, 到达光电管上的会聚光斑发散角和发射光波的发散角近似相等。由于参考光与发射光来源于同一束光, 发散角相同, 因此接收到的信号光和参考光的发散程度相同。只要调整参考光和信号光的光轴共轴, 就能实现大部分参考光和信号光发生干涉, 得到高的探测效率。图 7 是经过光路优化的离轴外差探测系统探测的平面镜外差效率图, 经计算, 外差效率达 85% 以上。因此, 对于合作目标外差探测系统, 马卡望远镜离轴使用时, 在发射能量提高 30% 以上的同时, 可以获得 85% 以上的外差探测效率。

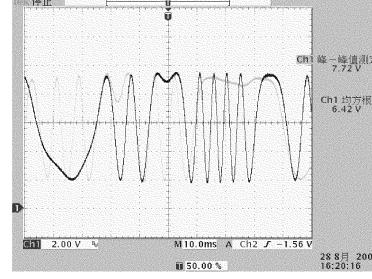


图 7 离轴外差探测系统对镜面探测的外差效率图

Fig. 7 Interference efficiency of plane mirror detected by off-axis heterodyne detection system

### 4 结论

通过对非合作目标和合作目标外差探测系统中信号光会聚角的分析, 得到非合作目标系统由于信号光的会聚角度大, 不能和参考光进行全部混

频,很难获得理想的外差效率;但是对于合作目标外差探测系统,信号光沿发射光的逆方向传播,即望远镜上只有发射光位置才能接收到信号光;信号光和参考光一样,都近似为平行光,光斑大小基本相等时,能获得85%以上的外差效率。另外,马卡望远镜离轴使用虽会引起波前畸变,但使用马卡望远镜的测量系统可使测量距离在几十米或者更远。而由大气扰动引起的波前畸变远远大于离轴使用引起的波前畸变,离轴使用引起的畸变可以不考虑。因此,对合作目标外差探测系统,马卡望远镜离轴使用既可以提高发射光能量,又能获得高的外差效率。

#### 参考文献:

- [1] PATRICK D L. Laser tracker II : Sandia national laboratories' second generation laser tracking system[J]. SPIE, 1991, 1482: 61-68.
- [2] 常军,翁志成,姜会林,等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315-318.  
CHANG Jun, WENG Zhi-cheng, JIANG Hui-lin, et al. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9 (4): 315-318. (in Chinese)
- [3] 张亮,安源,金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.

ZHANG Liang, AN Yuan, JIN Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36 (2): 278-280. (in Chinese)

- [4] 伍和云,王培纲. 离轴反射式光学系统设计[J]. 光电工程, 2006, 33(1): 34-37.  
WU He-yun, WANG Pei-gang. Designs of reflective off-axis system [J]. Opto-Electronic Engineering [J]. 2006, 33(1): 34-37. (in Chinese)
- [5] 张玉侠,艾勇. 基于空间光通信卡塞格伦天线弊端的探讨[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 560-563.  
ZHANG Yu-xia, AI Yong. Drawback of Cassegrain antenna system based on space optical communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 560-563. (in Chinese)
- [6] 杨小丽. 光电子技术基础[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2005: 254-255.  
YANG Xiao-li. Fundamentals of optical electronics [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 254-255. (in Chinese)
- [7] 马宗峰,张春熹,张朝阳. 光学外差探测信噪比研究[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 889-892.  
MA Zong-feng, ZHANG Chun-xi, ZHANG Zhao- yang. Signal of noise ratio in optical heterodyne detection [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (5): 889-892. (in Chinese)