

# 激光外差探测中准直失配问题的研究

李 祥, 杨进华, 姜成昊, 张 宁, 杨镇源  
(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:**应用数值模拟的方法研究了信号光场分布为艾里函数,本振光场分布为高斯分布的激光外差探测过程中准直失配角对激光外差探测混频效率的影响;分析了基于艾里斑原理的接收光学系统抑制准直失配对混频效率影响的优缺点;提出了一种能够有效减小准直失配角对混频效率影响的信号接收技术——阵列探测器匹配接收技术。仿真结果表明这一匹配接收方法能够有效提高准直失配情况下的光电流的输出强度和混频效率,并能够有效提高接收机的视场。

**关键词:**外差探测;准直失配;数值模拟;匹配接收

**中图分类号:**TN958 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.005

## Study on collimation mismatch in laser heterodyne detection

LI Xiang, YANG Jin-hua, JIANG Cheng-hao, ZHANG Ning, YANG Zhen-yuan

(Photoelectrical Engineering College Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

**Abstract:** Influence of collimation mismatch angle on laser heterodyne detection mixing efficiency is studied under the conditions of local beam optical field distribution as Gaussian distribution and signal beam optical field distribution as Airy function. The advantages and disadvantages of receiving optical system based on Airy disk principle in decreasing the influence of collimation mismatch on mixing efficiency are analyzed. In addition, a new method called array detectors matching receiving method is put forward, which effectively decreases the influence of collimation mismatch angle on mixing efficiency. Result shows this method can effectively improve the mixing efficiency and current output when collimation mismatch angle exists. By this method heterodyne detection under the condition of big collimation mismatch angle can be implemented. Furthermore, this method has wide receiving field of view.

**Key words:** heterodyne detection; collimation mismatch; numerical simulation; matching receiving

### 1 引 言

外差探测是公认的具有量子探测极限本领的探测体制,与直接探测相比,激光外差探测理论上具有灵敏度高、转换增益大、信噪比高等诸多优点,非常适合远距离微弱信号的测量。在远距离相干光通信、激光雷达、工业超精密测量等领域有着广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。

早在20世纪80年代中期,麻省理工学院就将激光外差探测技术应用于星间激光传输实验的研究项目中,几乎同一时间,美国人将这一技术应用到合成孔径激光雷达的实验中。我国在这方面的研究起步较晚,目前中科院电子所、中科院上海光机所、西安电子科技大学等单位在进行相干激光雷达的研究过程中

进行了大量激光外差探测的理论研究和实践工作。

探测器光敏面上信号光斑与本振光斑的准直失配是影响外差探测混频效率的重要因素。产生准直失配的原因有两点:(1)目标出现在偏离光轴的接收机视场内的不同位置引起的光敏面上信号光等相位面倾斜造成的准直失配。(2)装调等因素引起的准直失配。为了研究准直失配问题引入外差探测混频效率的概念。本文在假定光敏面上信号光为艾里斑分布,本振光服从高斯分布的基础上,研究了信号

**基金项目:**吉林省科技发展计划项目(No. 20120360)资助。

**作者简介:**李 祥(1987-),男,硕士研究生,主要从事激光雷达、微弱光信号检测方面的研究。E-mail:lixiang\_cust@163.com

**收稿日期:**2013-08-06

光和本振光的准直失配角对混频效率的影响。讨论了现有解决方法的优缺点。提出了能够有效降低准直失配对混频效率影响的阵列探测器匹配接收技术,并进行了仿真验证。

### 2 理论分析

光学外差探测原理如图 1 所示,激光器发出的激光经分光棱镜后分做信号光和本振光,信号光到达待测目标后被反射,本振光与信号光在探测器光敏面上合光,输出含有差频信息的中频电流信号。

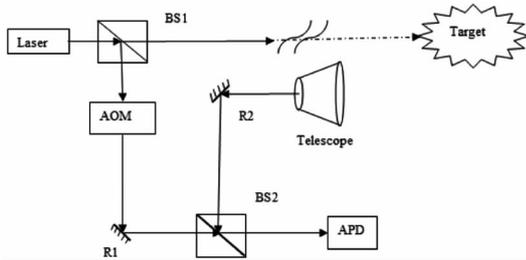


图 1 激光外差探测原理图

Fig.1 Laser heterodyne detection schematic diagram

探测器输出的中频电流信号为:

$$i_{if} = \frac{\eta e}{zh\nu} \iint_{\sigma} A_l(r)A_s(r) \cos(\Delta\phi) dS \times \cos(\omega_{if}t + \phi) \quad (1)$$

式中,中频光电流的振幅为光斑中心对准且中心点相位差为  $\pi$  的整数倍时的电流强度值; $\eta$  为量子效率; $e$  为电子元电荷的电量; $z$  为探测器表面介质的本征阻抗; $h$  为普朗克常数; $\nu$  为光源的频率; $\sigma$  为探测器光敏面面积。 $A_s(r)$  和  $A_l(r)$  为信号光和本振光在探测器光敏面上形成的艾里斑和高斯光场的振幅分布; $\omega_{if}$  为中频电流信号的角频率; $\phi$  为光电流的初始相位。 $\Delta\phi$  为探测器光敏面上任一点相对于中心点的相位差。

在光外差探测中,一般本振光功率较大且远远大于信号光功率,这样系统的噪声主要由穿越势垒的载流子的随机涨落引起的散粒噪声<sup>[2]</sup>,引起的噪声电流<sup>[3]</sup>:

$$i_{Nsh}^2 = 2ei_{dc}B \quad (2)$$

其中, $i_{dc}$  为光电流的直流分量; $B$  为噪声带宽。信噪比为:

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{\langle i_{if} \rangle^2}{\langle i_{Nsh} \rangle^2} \\ &= \frac{\eta}{h\nu B} \frac{[\iint_{\sigma} A_s(r)A_l(r) \cos(\Delta\phi) dS]^2}{2z \iint_{\sigma} [A_s^2(r) + A_l^2(r)] dS} \\ &= \eta_h \frac{\eta P_s}{h\nu B} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $P_s$  为信号光功率; $\eta_h$  为光外差探测混频效率,表达式为<sup>[4]</sup>:

$$\eta_h = \frac{[\iint_{\sigma} A_s(r)A_l(r) \cos(\Delta\phi) dS]^2}{\iint_{\sigma} A_s^2(r) dS \iint_{\sigma} A_l^2(r) dS} \quad (4)$$

这里假定光敏面上信号光服从艾里斑分布,本振光为高斯光,仿真结果显示在探测器半径等于艾里斑半径且束腰半径/艾里斑半径比值为 63% 时混频效率最高,可达 83%。当探测器光敏面上信号光波矢量与本振光波矢量之间存在微小失配角  $\theta$  的情况下。探测器上一点相对中心点的相位差为  $\Delta\phi = 2\pi r \cos\alpha \sin\theta / \lambda$ 。带入混频效率表达式,混频效率随夹角的变化如图 2 所示,这里假设本振高斯光束腰准确成像在探测器光敏面上。分别取探测器和艾里斑的半径为 0.15 mm,0.25 mm,0.5 mm,1 mm,光源波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,据仿真结果,准直失配角对混频效率的影响非常明显,几毫弧度的微小夹角就可以完全探测不到外差信号。

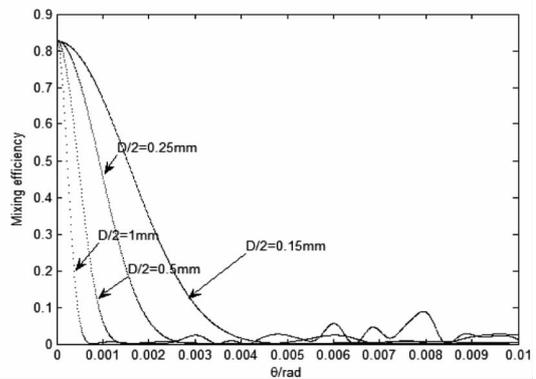


图 2 混频效率随失配角的变化( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ )

Fig.2 Relationship between mixing efficiency and mismatch angle( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ )

### 3 阵列探测器匹配接收技术

观察公式(1)可以得到这样的现象:在光外差探测存在准直失配的情况下,若探测器上两点的光电流相位相差  $\pi$ <sup>[5]</sup>,那么光电流的大小会被严重抵消。这是准直失配角降低外差探测光电流强度的作用方法。

在信号光和本振光存在准直失配角的情况下,探测器光敏面上光电流的振幅一般分布情况如图 3 所示。

解决这一问题的一种方法是采用基于艾里斑原理的接收光学系统,该方法在参考文献[6]中已有详细叙述。设置艾里斑尺寸与探测器的尺寸相等,以达到限制接收视场的目的。从而将探测器光敏面

上信号光与本振光的准直失配角限制在  $\lambda/D$  内以抑制准直失配对混频效率的影响。这一方法可以明显提高混频效率,但该方法对光学系统参数的要求非常严格,对光学系统的设计和装调提出了很高的要求,且接收视场角只有  $\lambda/D_r$  ( $D_r$  为接收机有效孔径),也就是说这一方法是以牺牲接收视场角为代价的,激光雷达不同于微波雷达,激光波长远小于微波波长,采用这一方法将严重限制激光外差探测的成像带宽。

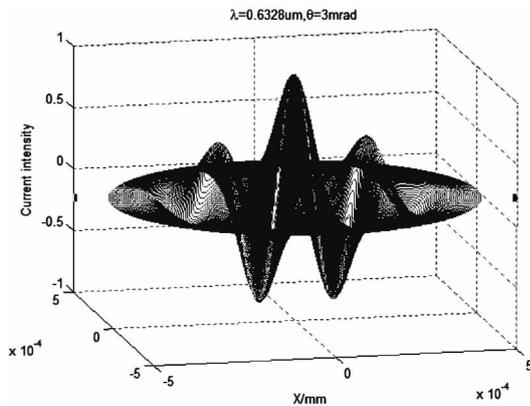


图3 光敏面上电流强度分布

Fig. 3 Current intensity distribution on photosensitive surface

由图3可以发现,存在准直失配的情况下,探测器上光电流的分布沿某一方向成余弦分布,这一方向即为信号光场与本振光场的夹角方向。同时根据探测器上光电流相位分布情况可知,光电流在这一方向上具有频率为  $\lambda/\sin\theta$  的周期分布特性。若将探测器光敏面上负向光电流或正向电流进行遮光处理,光电流就不会产生抵消现象,理论上就可获得较大峰值的中频电流信号。基于这一思想提出了阵列探测器匹配接收方法:若有一个单元尺寸和间距均为  $d$  的  $N \times N$  光电探测器阵列,所有探测器经高速数字开关与电流求和模块相连,数字开关由高速控制模块控制。通过控制模块向数字开关发送指令:首先在一个方向上以中心点为基准通过控制数字开关的开闭设定不同的接收宽度进行扫描,然后反复在  $360^\circ$  范围上进行上述扫描过程。当输出光电流信号强度最大时即达到最佳匹配。由于高速数字开关的指令响应时间非常短,因此可以在视场内进行高速扫描。

应用阵列探测器匹配接收方法的接收光学系统原理图如图4所示,这里接收光学系统用共输出望远镜系统取代单透镜聚焦系统,这是因为望远镜系统相比基于艾里斑的光学接收系统有较大的接收视场。为了信号光斑在阵列探测器不发生偏移,阵列探测

器需要紧贴望远镜系统的目镜放置,本振光经倒置望远镜系统扩束后信号光在阵列探测器上进行匹配接收。本振激光的束腰需准确成像在阵列探测器光敏面上。

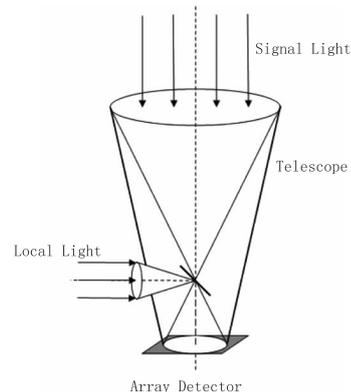


图4 阵列探测器匹配接收光路图

Fig. 4 The detector array receiving light path diagram

图5显示了应用匹配接收技术和直接进行探测的外差混频效率随准直失配角  $\theta$  的变化情况。图中艾里斑直径和探测器光敏面的直径均为  $0.5 \text{ mm}$ ,取光源波长  $0.6328 \mu\text{m}$ ,结果显示应用光电流分布匹配接收技术能够获得较高的混频效率。在不进行匹配接收时,混频效率在  $2 \text{ mrad}$  时已经下降为0。应用匹配接收时这一失配角下仍可获得18%的混频效率,匹配接收的混频效率随失配角的持续增大保持18%左右。

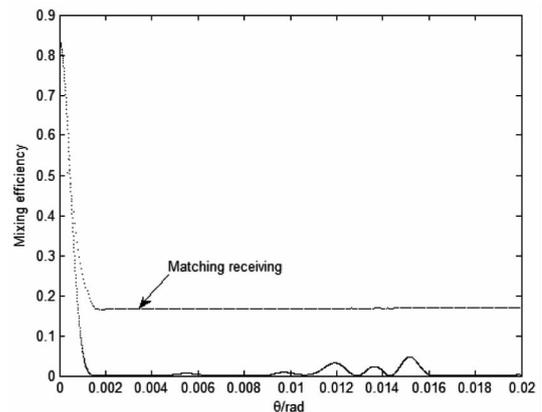


图5 混频效率随失配角的变化

Fig. 5 Relationship between mixing efficiency Figure and mismatch angle

图6显示了应用阵列探测器匹配接收技术前后归一化电流的输出情况。结果表明,匹配接收可明显提高光电流的强度。

基于阵列探测器匹配接收方法有以下优点:

- (1) 显著提高了准直失配下光电流的输出强度和混频效率。
- (2) 适合较大准直失配角条件下的外差探测。

可以认为对角度的探测范围取决于探测器阵列的制造工艺水平。

(3) 有较大的接收视场。通过使用可编程控制探测器阵列大大提高了激光外差探测的接收视场角。例如,照明激光波长为  $10.6\ \mu\text{m}$ , 最小光电探测单元的尺寸为  $20\ \mu\text{m}$ , 那么理论上阵列探测器上允许的最大失配角为  $0.26\ \text{rad}$ , 在望远系统放大率为 10 倍的情况下, 接收视场角为  $26\ \text{mrad}$ , 明显大于接收孔径的衍射极限角。

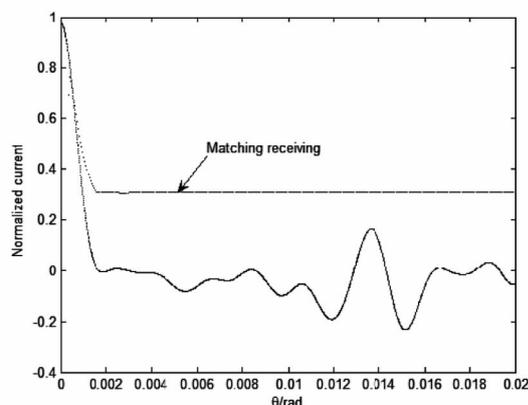


图6 归一化电流随失配角的变化

Fig. 6 Relationship between normalized current and mismatch angle

#### 4 结论

阵列探测器光敏面匹配接收方法有效降低了激光外差探测中信号光与本振光的光束准直难度; 提高准直失配下的混频效率和光电流输出强度; 适合较

大失配角条件下的外差探测; 挣脱了相干探测天线方程对接收视场的束缚, 具有较大的接收视场角。

#### 参考文献:

- [1] Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Yan Tingyang, et al. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 889-892. (in Chinese)  
马宗峰, 张春熹, 张朝阳, 等. 光学外差探测信噪比研究[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 889-892.
- [2] Albert V Jelalian. Laser radar system[M]. London: Artech House, 1991: 19-20.
- [3] M C Teich. Infrared heterodyne detection[J]. Proc. IEEE, 1968, 56(1): 37-39.
- [4] Wang Lizhi. Study on optical heterodyne detection in coherent optical communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 11-24. (in Chinese)  
王丽枝. 相干光通信外差探测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 11-24.
- [5] Zhao Xiaoyan, Yang Yang. Study on heterodyne detection of synthetic aperture radar[J]. Electronic Sci & Tech, 2010, 23(8): 75-76. (in Chinese)  
赵小燕, 杨阳. 合成孔径激光雷达外差探测的影响研究[J]. 电子电路, 2010, 23(8): 75-76.
- [6] Xing Xudong. The optical system research on techniques of coherent laser detect[D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 12-30. (in Chinese)  
邢旭东. 应用于激光相干探测技术的光学系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 12-30.