

## 高斯光束场分布对相干探测混频效率的影响

李向阳, 马宗峰, 石德乐

(山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264670)

**摘要:** 在相干探测系统中, 信号光与本振光在探测器上进行混频产生中频信号, 实现将携带目标信息的信号光转置与放大, 实现了近量子噪声限的探测方式。为了有效利用回波信号获得良好的探测性能, 有必要对两束光的混频特性进行研究。信号光与本振光在探测器光敏面上的分布决定了两束光的混频效率, 只有信号光与本振光的场分布完全一致探测器输出的中频光电流最大。通过对高斯光束的混频进行理论推导并进行数值模拟, 结果表明混频效率对光敏面上信号光的分布较为敏感, 本振光束腰半径应该等于或略大于信号光束腰的半径, 探测器光敏面半径应约为本振光束腰半径的 2 倍。

**关键词:** 相干探测; 混频效率; 高斯光束; 数值模拟

中图分类号: TN247 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)02-0539-05

## Effect of Gaussian fields distribution on mixing efficiency for coherent detection

Li Xiangyang, Ma Zongfeng, Shi Dele

(Shandong Aerospace Electro-Technology Institute, Yantai 264670, China)

**Abstract:** A detectable intermediate frequency current signal is generated by mixing the signal beam with the local oscillator beam in a coherent detection system. The signal beam which carries the target information is amplified and frequency shifted to allow operation at a sensitivity that approaches the shot-noise limit. To make full use of the return signal and achieve preferable performance, the mixing characteristics should be considered. Signal and local oscillator beam incident on the surface of photo-detector, and the influence of fields distribution on mixing efficiency was discussed in this paper. The highest intermediate frequency current could only be achieved when the field distribution of the signal beam was completely identical with that of the local oscillator beam. For both the signal and local oscillator were Gaussian beam coherent in different conditions, such as focus offset, beam waist difference and beam waist mismatch, the mixing efficiency was theoretically analyzed and numerically. Numerical simulation shows that the mixing efficiency is more sensitive to the alignment of the incident signal beam than that of the local oscillator beam, the radius of the local oscillator beam waist should be equal or slightly larger than that of the signal beam, the detector radius should be double that of the local oscillator beam waist.

**Key words:** coherent detection; mixing efficiency; Gaussian beam; numerical simulation

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61302162); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA120605)

作者简介: 李向阳(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光应用技术方面的研究。Email: [lixxy264670@163.com](mailto:lixxy264670@163.com)

## 0 引言

与直接探测比较,相干探测<sup>[1]</sup>方式是公认的具有量子极限探测本领的体制,信噪比是光学相干探测系统的重要参量。相干探测中,本振光在放大返回信号光的同时还引入了噪声。光电探测器在输出中频光电流的同时也响应各类噪声,因此光束的混频特性会影响到探测信噪比的变化。张桐在文章<sup>[2]</sup>中分析了相干激光通信系统中高斯光束与平面光准直失配对混频效率的影响。Guo Wei 等<sup>[3-5]</sup>人对艾理分布与高斯分布光场混频的特性进行了研究,给出了场分布对探测性能的影响。提高相干探测信噪比的基本途径是优化光电探测器感光面上本振光与信号光的混频特性,实现两束光的波前吻合,除此之外还要对光束准直、偏振进行严格控制,并根据探测器的输出特性选择合适的本振光功率<sup>[6]</sup>。

刘宏展<sup>[7]</sup>对相干探测中高斯光束的混频仅研究了两光束满足波前振幅匹配时混频效率,文中以两高斯光束相干的混频效率为研究对象,分析了光束束腰半径、探测器尺寸、光束聚焦等因素对相干特性的影响,给出了理论分析,通过数值仿真给出了合理的工作区间。

## 1 理论分析

### 1.1 相干探测系统描述

典型的激光相干探测系统如图 1 所示。相干探测是一种主动探测方式,激光光源经过发射装置将光束照射到被探测目标上,经过目标反射或散射后的信号光经过接收装置回收与激光光源分束的光在光电探测器上混频。由于目标的相对运动,信号光与本振光相比较会产生一个频率差,即目标的多普勒频移。由于光电探测器的响应带宽有限,不能够对激光的频率响应,只能响应两束光的拍频分量,经隔直输出一个中频光电流,其频率即为多普勒频移,从而实现对信号光的转置与放大。

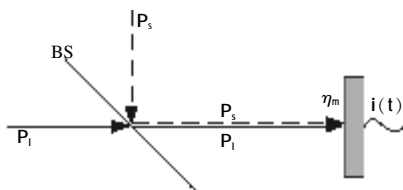


图 1 相干探测系统

Fig.1 Coherent detection system

在相干探测系统中,包含目标信息的信号光被调制到中频光电流上,中频光电流可用下式描述<sup>[8]</sup>:

$$i_{ac} = \frac{R}{2Z} \int_D A_s(r, \varphi) A_l(r, \varphi) \cos(\omega_d t, \Delta\varphi) dS \quad (1)$$

式中:  $R$  为光电探测器的响应度;  $Z$  为探测器特征阻抗;  $D$  为探测器面积;  $A_s(r, \varphi)$ 、 $A_l(r, \varphi)$  为探测器光敏面上光场的振幅分布;  $\omega_d$  为角频率差;  $\Delta\varphi$  为相位差;  $r$  为到对称光轴的距离。

实现对信号光的转置放大并压缩噪声的带宽是相干探测比直接探测灵敏度高的主要原因。由激光雷达方程可知接收到的光功率比发射出去的光功率通常低几个数量级,那么本振光功率引起的散粒噪声将会压制背景噪声等其他噪声成为主要的噪声源。光电探测器输出的直流光电流可以近似用响应本振光产生的直流分量来描述。

$$i_{dc} = \frac{R}{2Z} \int_D u_l^2(r, \varphi) dS \quad (2)$$

### 1.2 混频效率

由上节分析可知,本振光功率一般比返回信号光功率大几个数量级,这时因本振光引起的散粒噪声成为主要的噪声源,那么相干探测系统的信噪比可以近似表示为中频光电流均方与本振散粒噪声均方的比,可以用下式描述:

$$SNR = \frac{\langle i_{ac}^2 \rangle}{2qBi_{dc}} = \eta_m \frac{RP_s}{qB} \quad (3)$$

式中:  $\eta_m$  为混频效率;  $q$  为电子电量;  $B$  为噪声带宽。

$$\eta_m = \frac{\left| \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} u_s(r, \theta) u_l(r, \theta) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} |u_s^2(r, \theta)| r dr d\theta \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} |u_l^2(r, \theta)| r dr d\theta} \quad (4)$$

式中:  $r_0$  为光电探测器光敏面的半径;  $u(r, \theta)$  光电探测器光敏面上归一化场分布。由公式(4)可以看出,混频效率小于等于 1,且与光电探测器光敏面上本振光和信号光的场分布有关。相对于微波,光的波长小几个数量级,因此要实现光的相干检测光束的应满足很高的控制精度。下面分析双高斯光束光束控制对信噪比的衰减影响。

## 2 高斯光束混频效率理论分析

### 2.1 理论推导

在很多实际应用中,信号光与本振光场强均为

高斯分布的光, 其强度亦为高斯分布, 可表示为:

$$I = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \quad (5)$$

式中:  $I_0$  为主轴处的光强;  $w$  如下式所示。

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (6)$$

式中:  $w_0$  为高斯光束的束腰半径;  $z$  为轴向坐标;  $\lambda$  为光的波长。高斯光束可以用下式描述<sup>[9]</sup>:

$$u(r, z) = \frac{Aw_0}{w(z)} \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z)}\right] \cdot \exp\left\{j\left[\frac{\kappa r^2}{2R(z)} - \omega t + \kappa z + \Phi\right]\right\} \quad (7)$$

式中:  $w(z)$ 、 $R(z)$  和  $\Phi$  分别为高斯光束的束宽、等相面曲率半径和相位因子, 它们是高斯光束的三个重要参量, 且满足下面的关系。

$$\begin{cases} z_0 = \frac{1}{2} \kappa w_0^2 \\ w(z) = w_0 \sqrt{1 + \xi^2} \\ R(z) = z_0 \left(\xi + \frac{1}{\xi}\right) \\ \Phi(z) = \arctan \xi \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\kappa = \omega/c$ ;  $\xi = z/z_0$ ;  $c$  为光速。假设发生混频的两束光均为高斯光束, 归一化光场分布<sup>[9]</sup>为:

$$u'_i(r) = \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z_i)}\right] \times \exp\left\{j\left[\frac{\kappa r^2}{2R(z_i)} + \kappa z_i + \Phi_i\right]\right\} \quad (9)$$

$$u'_s(r) = \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z_s)}\right] \times \exp\left\{j\left[\frac{\kappa r^2}{2R(z_s)} + \kappa z_s + \Phi_s\right]\right\} \quad (10)$$

令  $\beta = \sqrt{2}/w(z)$ , 将公式(9)与公式(10)代入混频效率计算公式(4)积分得:

$$\eta_m = 4\beta_s^2 \beta_i^2 \times \left[ \exp(-r_0^2 \beta_s^2 - r_0^2 \beta_i^2) - 2 \exp\left(-\frac{r_0^2 \beta_s^2 + r_0^2 \beta_i^2}{2}\right) \cos\left(\frac{r_0^2 \beta_s^2 \xi_s + r_0^2 \beta_i^2 \xi_i}{2}\right) + 1 \right] / \left\{ [(\beta_s^2 + \beta_i^2)^2 + (\beta_s^2 \xi_s - \beta_i^2 \xi_i)^2] \times [1 - \exp(-r_0^2 \beta_i^2)] \right\} \quad (11)$$

### 2.2 最佳混频

对于给定信号光的光场, 混频效率取得最大值时有:

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial (r_0 \beta_i)} = 0, \quad \frac{\partial \eta_m}{\partial (\xi_i)} = 0 \quad (12)$$

即

$$w_s = w_i, \quad z_s = z_i \quad (13)$$

由公式(13)知道, 当两者的光斑和波前重合时相干混频效率最大, 此时混频效率可以简化为:

$$\eta_m = 1 - \exp(-2r_0^2/w^2) \quad (14)$$

因为高斯光束束腰处的束宽最小, 由公式(14)可以看出, 当探测器的光敏面半径确定后当探测器位于高斯光束束腰处( $\xi=0$ )时混频效率最大。混频效率可以表示为:

$$\eta_m = 1 - \exp(-2r_0^2/w_0^2) \quad (15)$$

图 2 为高斯光束的混频效率随着探测器尺寸的变化曲线, 从中可以看出: 相对于高斯光束的束腰半径, 探测器的尺寸过小会导致功率泄漏, 接收信号光不能充分利用; 探测器的尺寸增大到一定的尺寸混频效率接近于 1。

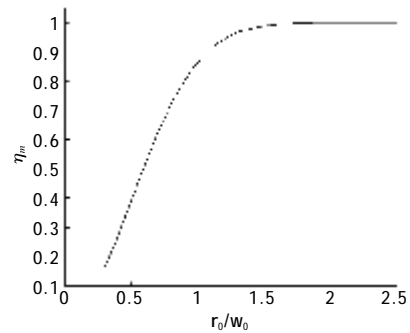


图 2 不同探测器尺寸的混频效率

Fig.2 Mixing efficiency as a function of the ratio  $r_0/w_0$

## 3 高斯光束混频效率数值模拟

### 3.1 探测器轴向偏离时

当场的匹配满足公式(13)时, 但高斯光束束腰离探测器光敏面有一段距离, 即回波信号光聚焦不准时( $\xi_s = \xi_i \neq 0$ ), 公式(11)可以简化为:

$$\eta_m = \frac{\exp\left(\frac{-4}{1+\xi^2} \frac{r_0^2}{w^2}\right) - 2 \exp\left(\frac{-2}{1+\xi^2} \frac{r_0^2}{w^2}\right) + 1}{1 - \exp\left(\frac{-2}{1+\xi^2} \frac{r_0^2}{w^2}\right)} \quad (16)$$

此时混频效率如图 3 所示。

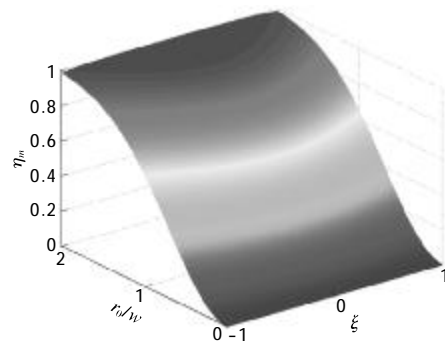


图 3 聚焦不准时混频效率( $\xi_s = \xi_i \neq 0$ )

Fig.3 Mixing efficiency for focus points offset

由图 3 可见, 当  $r_0/w$  较大时混频效率受聚焦的影响较小, 接近理论最大值 1; 当  $r_0/w$  较小时混频效率受聚焦的影响较大, 此时的混频效率最大值也很小, 这是因为此时探测器的尺寸小, 回波信号光得不到充分利用。

### 3.2 束腰半径不同时

当本振光与信号光的光束束腰完全在探测器光敏面上 ( $\xi_s = \xi_l \neq 0$ ), 但两束光的束腰半径不同时, 两束光不满足振幅的匹配, 混频效率受到光束束腰半径和探测器尺寸的影响, 假设  $w_s$  为常数, 令  $x = w_l/w_s$ ,  $y = r_0/w_s$  则公式(11)可以简化为:

$$\eta_m = \frac{4x^2}{(1+x^2)^2} \times \frac{\exp\left(\frac{-2y^2x^2 - 2y^2}{x^2}\right) - 2\exp\left(\frac{-y^2x^2 - y^2}{x^2}\right) + 1}{1 - \exp\left(\frac{-2y^2}{x^2}\right)} \quad (16)$$

此时, 混频效率如图 4 所示。

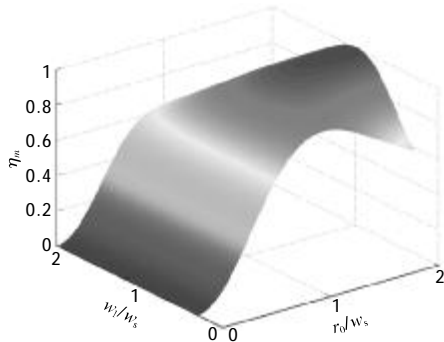


图 4 束腰半径不同时的混频效率

Fig.4 Mixing efficiency for different beam waist

由图 4 可知, 对不同的探测器尺寸: 本振光束腰半径较大 ( $w_l/w_s \geq 1$ ) 时, 随着探测器尺寸的增大信号光振幅减小较快, 使得混频效率出现一个最大值; 本振光束腰半径较小 ( $w_l/w_s \leq 1$ ) 时, 随着探测器尺寸的增大本振光振幅减小较快, 这时混频效率是一个增函数; 束腰半径相差越大对混频效率的影响越大。

### 3.3 束腰位置不同时

当混频的两束光的束腰半径相同 ( $w_l = w_s$ ), 出现光束控制误差使得其中一束光的束腰不在探测器光敏面处时。

其中, 本振光束腰偏离光敏面时混频效率如图 5 所示, 信号光束腰偏离光敏面时混频效率如图 6 所

示。

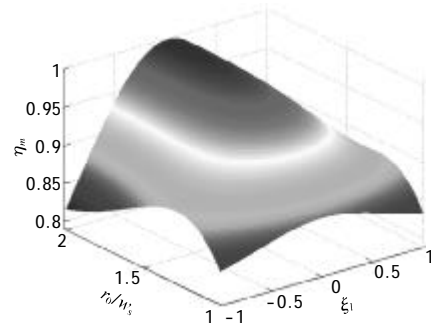


图 5 本振光束腰偏离光敏面时混频效率

Fig.5 Mixing efficiency for local oscillator focus error

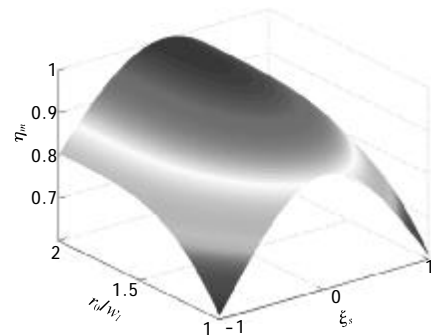


图 6 信号光束腰偏离光敏面时混频效率

Fig.6 Mixing efficiency for signal light focus error

由图可以看出, 当其中一光束束腰与探测器光敏面重合, 而另一光束束腰偏离探测器光敏面时: 偏离对混频效率的影响程度不同, 信号光的偏离影响较大, 本振光的偏离影响较小。

## 4 结论

光学相干探测具有比直接探测更高的探测精度和良好的滤波性能, 它已成为固体目标探测方式的首选。光学相干探测利用大功率本振光可以实现微弱回波光信号的转置放大, 并把自身携带的目标信息调制在频率较低的中频信号上。当探测器光敏面上本振光与信号光满足准直、偏振和垂直入射时, 中频信号最大。探测性能与探测器光敏面上回波光和本振光的光场分布有着密切关系。文章对基模高斯的光混频进行理论推导并进行数值模拟, 结果表明为了提高混频效率应该将混频光束的束腰重合并控制在光敏面上, 本振光的束腰半径应等于或略大于信号光束腰半径, 且光敏面半径与本振光束腰半径之比约为 2。

## 参考文献:

- [1] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720-1724. (in Chinese)  
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1720-1724.
- [2] Zhang Tong, Tong Shoufeng. Effect of collimating mismatch on mixing efficiency for space coherent laser communication[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(1-2): 13-15. (in Chinese)  
张桐, 佟首峰. 准直失配对空间相干激光通信混频效率的影响[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(1-2): 13-15.
- [3] Wei Guo, Zhou Jian, Long Xingwu. Analysis of signal-to-noise ratio and heterodyne efficiency for reference-beam laser Doppler velocimeter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 44(1): 108-113.
- [4] Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, et al. Signal-noise ratio in heterodyne detection [J]. *Acta Optical 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.
- [5] Zhou Jian, Feng Qingqi, Long Xingwu, et al. Signal-to-noise ratio and doppler current of laser doppler velocimeter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36 (6): 46-51. (in Chinese)  
周健, 冯庆奇, 龙兴武, 等. 激光多普勒测速仪信噪比及多普勒电流的研究[J]. *光电工程*, 2009, 36(6): 46-51.
- [6] Ma Zongfeng, Wang Jiqiang, Luo Guangming, et al. Optimum optical local-oscillator power for all-fiber coherent lidar [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009(2): 286-290. (in Chinese)  
马宗峰, 王纪强, 罗光明, 等. 全光纤相干激光雷达本振光功率优化[J]. *半导体光电*, 2009(2): 286-290.
- [7] Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan, et al. Effect of amplitude profile differency of signal and local oscillator wave on heterodyn efficiency in the inter-satellite coherent optivcal communication system [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, 31(10): 1006001-1-6. (in Chinese)  
刘宏展, 纪越峰, 许楠, 等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1006001-1-6.
- [8] Jiang Chenghao, Yang Jinhua, Zhang Lijuan, et al. Schematic design and simulation of new Doppler imaging laser radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 411-416. (in Chinese)  
姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 等. 新型多普勒成像激光雷达原理设计与仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (2): 411-416.
- [9] Liu Liren. Optical antenna of telescope for synthetic aperture ladar[C]//SPIE, 2008, 7094: 70940F.