

文章编号: 0253-2239(2007)05-0889-4

光学外差探测信噪比研究

马宗峰 张春熹 张朝阳 颜廷洋

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 对于光学外差探测系统而言,为了有效利用回波信号,需要对信噪比这一表征系统性能的重要指标进行研究。从理论分析了信噪比,给出了计算信噪比的一般公式。理论分析表明,当探测器光敏面上本振光与信号光的振幅、相位、偏振都满足严格的匹配时,外差效率最大。对场分布为艾里函数的光外差信噪比进行研究和数值模拟。结果表明,当艾里斑尺寸的比例系数控制在 $0.8 \sim 1.2$ 内,并使信号光斑主轴偏移量 x_0 控制在 0.5 以下,探测器的尺寸在 $(0.6 \sim 0.8)\lambda f/d$ 内时,可获得大于 $0.7\eta P_s/h\nu B$ 的信噪比。

关键词: 光电子学; 光学外差探测; 信噪比; 数值模拟; 外差效率

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Signal-Noise Ratio in Optical Heterodyne Detection

Ma Zongfeng Zhang Chunxi Zhang Zhaoyang Yan Tingyang

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 10083)

Abstract: Signal-noise ratio (SNR) is an important parameter for the performance of a heterodyne detection system. In order to make full use of the received signal, the signal-noise ratio should be analyzed. The principle of signal-noise ratio is discussed, and general equations for a shot noise limited operation are derived in terms of the distribution functions of the local oscillator and signal fields, the size and quantum efficiency of the detector. To obtain the maximum signal-noise ratio, the phase, amplitude and polarization of the local oscillator and the signal light should be matched strictly. Finally, the signal-noise ratio is discussed for Airy function distribution fields. Numerical simulations show that when the ratio of the size for Airy disks is controlled within $0.8 \sim 1.2$, the bias x_0 of Airy disk axis below 0.5 , the size of detector in the range $(0.6 \sim 0.8)\lambda f/d$, the signal-noise ratio is above $0.7\eta P_s/(h\nu B)$.

Key words: optoelectronics; optical heterodyne; signal-noise ratio; numerical simulation; heterodyne efficiency

1 引 言

外差干涉仪具有测量速度快、精度高、抗干扰能力强、重复性好等优点,已成为理想的超精密检测及测量仪器^[1],广泛应用于超精密测量、检测、加工设备、激光雷达系统等。

信噪比是光学外差探测系统的重要参量,而外差探测方式是公认的具有量子极限探测本领的体制^[2]。与直接探测比较,外差探测具有本振参考光,因此本振噪声是噪声的另一个来源^[3]。为了压制其他噪声源,如暗电流、热噪声等,一般要提高本振光功率以实现探测器的散弹噪声限工作模式,本振光

功率 P_0 的引入将使本振散粒噪声大大超过热噪声及其他散粒噪声^[4]。当本振光的功率足够大,并且可以忽略背景噪声和暗电流,则信噪比(SNR)可以表示为^[3]

$$R_{SN} = \eta P_s / (h\nu B), \quad (1)$$

式中 η 为量子效率, P_s 为信号功率, h 为普朗克常量, ν 为本振光的频率, B 为噪声带宽。

可见,除了量子效率以外,信噪比还受到探测器光敏面上本振光与信号光的场分布以及探测器的形状、尺寸等因素的影响。本文分析了这些因素对信噪比的影响,给出了计算信噪比的一般公式,并进行了数值模拟。

作者简介: 马宗峰(1980—),男,山东临沂人,博士研究生,主要从事光学传感、外差探测方面的研究。

E-mail: mzf706@163.com

导师简介: 张春熹(1965—),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,主要从事光电检测与信号处理、光纤陀螺及其导航系统、光波导与集成光学技术等方面的研究。E-mail: zhang_chunxi@163.com

收稿日期: 2006-05-29; 收到修改稿日期: 2006-08-23

2 理论分析

光学外差探测的原理如图 1 所示。激光器发出的光经分束器后分成两束，一束光作为本振光，另外一束光经过收发合置光学系统后，照射到探测目标上，经目标散射回来的光即为信号光，本振光与信号光在探测器的光敏面上混频。

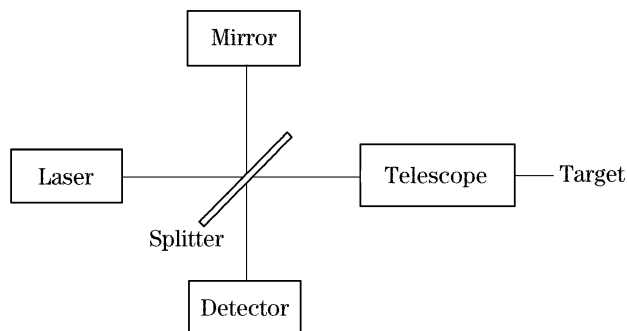


图 1 光学外差探测原理

Fig. 1 Principle of heterodyne detection system

在实际应用中，轴对称分布的光场最为常见，假设信号光与本振光的电场分布分别为 E_s 和 E_{l_0} ：

$$\begin{aligned} E_s &= A_s(r) \cdot \exp[i(\omega_s t + \phi_s)], \\ E_{l_0} &= A_{l_0}(r) \cdot \exp[i(\omega_{l_0} t + \phi_{l_0})], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $A_s(r)$, A_{l_0} 分别为信号光与本征光在探测器光敏面上电场的振幅, ω_s , ω_{l_0} 分别为信号光与本征光的角频率, ϕ_s , ϕ_{l_0} 分别为信号光与本征光的相位角,

r 为到对称光轴的距离。信号光的平均功率 P_s 表示为^[5]

$$P_s = \frac{1}{2z} \iint_0^{\infty} A_s^2(r) dS, \quad (3)$$

式中 z 为探测器表面介质的本征阻抗, S 为探测器光敏面的面积。假设 E_s 和 E_{l_0} 的偏振态相同, 可以得到探测器输出的光电流为^[4,5]

$$i = \frac{\eta e}{h\nu} \frac{1}{z} \iint_D \frac{1}{2} |E_s + E_{l_0}|^2 dS, \quad (4)$$

式中 D 为探测器光敏面的面积, e 为电子电量。因为探测器的响应带宽的限制, 光电流均值为

$$\langle i \rangle = \frac{\eta e}{2h\nu} \frac{1}{z} \iint_D [A_s^2(r) + A_{l_0}^2(r)] dS + \langle i_{if} \rangle, \quad (5)$$

i_{if} 为中频光电流：

$$i_{if} = \frac{\eta e}{h\nu} \frac{1}{z} \iint_D A_s(r) \cdot A_{l_0}(r) \cos(\omega_{if} t + \phi) dS, \quad (6)$$

这里有 $\omega_{if} = \omega_s - \omega_{l_0}$, $\phi = \phi_s - \phi_{l_0}$ 。

由于本振光远远大于信号光, 所以直流光电流主要由(5)式积分中的第一项构成。本振光的散粒噪声构成系统的主要噪声, 噪声电流均方值为^[6]

$$\langle i_n^2 \rangle = 2ei_{dc}B, \quad (7)$$

由(6)式与(7)式可以得到信噪比为

$$R_{SN} = \frac{\langle i_{if}^2 \rangle}{\langle i_n^2 \rangle} = \frac{\eta}{h\nu B} \cdot \frac{\left[\iint_D A_s(r) \cdot A_{l_0}(r) \cos \phi dS \right]^2 + \left[\iint_D A_s(r) \cdot A_{l_0}(r) \sin \phi dS \right]^2}{2z \iint_D A_{l_0}^2(r) dS}, \quad (8)$$

若 ϕ 在探测器的光敏面上恒为常量, 则有

$$R_{SN} = \frac{\left[\iint_D A_s(r) \cdot A_{l_0}(r) dS \right]^2}{\iint_D A_{l_0}^2(r) dS \cdot \iint_0^{\infty} A_s^2(r) dS} \cdot \frac{\eta P_s}{h\nu B}, \quad (9)$$

(9) 式中的第一项即为外差效率 η_h , 可以看出, 外差效率 $\eta_h \leq 1$ 且仅与归一化电场的分布有关, 所以有

$$\eta_h = \frac{\left[\iint_D U_s(r) \cdot U_{l_0}(r) dS \right]^2}{\iint_D U_{l_0}^2(r) dS \cdot \iint_0^{\infty} U_s^2(r) dS}, \quad (10)$$

式中 $U_s(r)$, U_{l_0} 分别为信号光与本征光的为归一化振幅, 最大值取 1。

比较(1)式、(10)式可以发现, 信噪比有一个衰减系数。

3 外差效率的数值模拟

在多数情况下, 信号光通过圆形光阑接收, 符合夫琅禾费衍射理论^[7]。经过光阑后的光再经过透镜形成艾里斑。假设信号光与本振光的艾里斑的尺寸相差一个比例系数 γ , 即归一化场的分布函数为

$$U_{l_0}(x) = \frac{2J_1(x)}{x}, \quad U_s(x) = \frac{2J_1(\gamma x)}{\gamma x}, \quad (11)$$

这里 $J_1(x)$ 为一阶贝塞尔函数, 由夫琅禾费小孔衍射理论可知 $x = kdr/f$, k 为波数, d 为光阑的半径, f 为透镜的焦距。此时的外差效率可以表示为

$$\eta_h = \frac{\left[\iint_D \frac{J_1(\gamma x)}{\gamma x} \cdot \frac{J_1(x)}{x} dS \right]^2}{\frac{\pi}{\gamma^2} \iint_D \left[\frac{J_1(x)}{x} \right]^2 dS}, \quad (12)$$

根据(12)式,通过数值模拟给出了光斑尺寸不同的外差效率随探测器尺寸的变化,如图 2 所示。可以看出, $\gamma=1.0$, 即信号光的艾里斑等于本振光的艾里斑时,外差效率是探测器尺寸的增函数,最大值在无穷远处取 1; $\gamma \neq 1.0$ 时,探测器的尺寸对外差效率的影响较大。

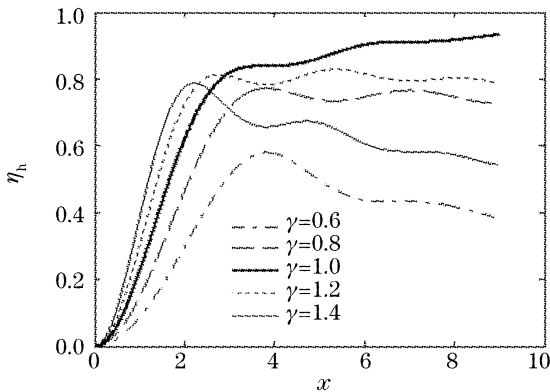


图 2 比例系数不同的外差效率随探测器尺寸的变化曲线

Fig. 2 Heterodyne efficiency η_h as a function of x for different ratios of Airy disk

图 3 给出了不同探测器尺寸时外差效率随比例系数 γ 变化。可知,对于不同的探测器尺寸,光斑大小失配较小时,即 γ 在 0.8~1.2 内取值时,可以取得大于 $0.7\eta P_s/(h\nu B)$ 的信噪比;信噪比取得最大值时对应的 γ 值不同。

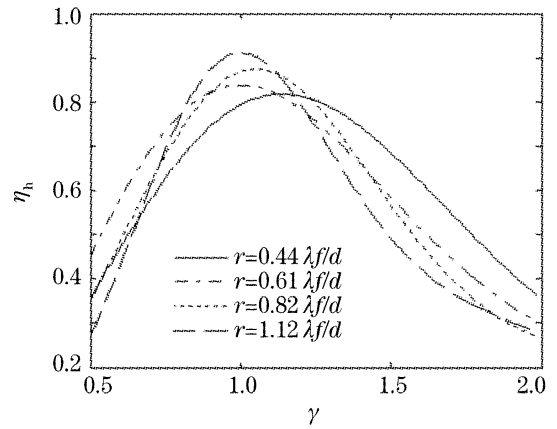


图 3 探测器尺寸不同的外差效率随比例系数 γ 的变化曲线

Fig. 3 Heterodyne efficiency η_h as a function of γ for various sizes of the detector

若信号与本振的光轴不重合,即有一个偏移量 x_0 , 此时归一化场分布为

$$\begin{aligned} U_{lo}(x) &= \frac{2J_1(x)}{x}, \\ U_s(x) &= \frac{2J_1[\gamma(x-x_0)]}{\gamma(x-x_0)}, \end{aligned} \quad (13)$$

则外差效率为

$$\eta_h = \frac{\left[\iint_D \frac{J_1[\gamma(x-x_0)]}{\gamma(x-x_0)} \cdot \frac{J_1(x)}{x} dS \right]^2}{\frac{\pi}{\gamma^2} \iint_D \left[\frac{J_1(x)}{x} \right]^2 dS}. \quad (14)$$

图 4 为不同探测器尺寸,光斑大小失配与光轴偏移共同作用对信噪比的影响。可以看出,若信号光与本振光没有对准,外差效率是光轴偏移量 x_0 的减函数。

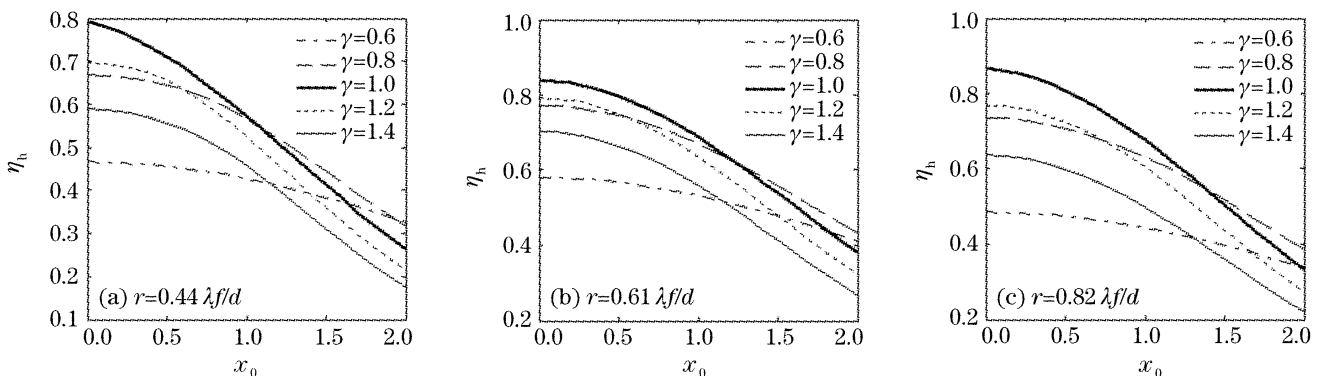


图 4 艾里斑比例系数不同时外差效率随 x_0 的变化。探测器尺寸为(a) $r=0.44\lambda f/d$, (b) $r=0.61\lambda f/d$, (c) $r=0.82\lambda f/d$

Fig. 4 Heterodyne efficiency η_h as a function of x_0 for different ratios of Airy disk. The size of detection

(a) $r=0.44\lambda f/d$, (b) $r=0.61\lambda f/d$, (c) $r=0.82\lambda f/d$

4 结 论

在本振噪声为主要噪声的外差探测系统中,光场在探测器光敏面上的分布决定外差效率的大小,

从而影响系统的信噪比和性能。从理论上给出了计算外差效率和信噪比的一般公式,并用数值模拟的方法对光场为艾里分布的光外差进行研究,结果表

明:若将光斑尺寸比例系数 γ 控制在 $0.8 \sim 1.2$ 范围内,并且使得信号光斑主轴偏移量 x_0 控制在 0.5 以下,探测器的尺寸控制在 $(0.6 \sim 0.8)\lambda f/d$ 范围内,可以获得大于 $0.7\eta P_s/(h\nu B)$ 的信噪比。这一方法对于其他光场分布的光外差同样适用,从而为实际应用中设计出高效的外差干涉仪提供一个有效的技术途径。

参 考 文 献

- 1 Zhong Zhi, Tan Jiubin, Ma Hongwen *et al.*. Study on fast ultra-precision measurement model in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 791~792 (in Chinese)
钟 志,谭久彬,马洪文等. 激光外差干涉快速超精密测量模型研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 791~792

- 2 Gary W. Kamerman, Brian J. Thompson. Coherent detection signal-to-noise[C]. *SPIE Milestone Series*, 1996. 76~77
- 3 Albert V. Jelalian. *Laser Radar System* [M]. Boston, London: Artech House, 1991. 19~20
- 4 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 255~257, 283~287 (in Chinese)
金国藩,李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 255~257, 283~287
- 5 Xie Chufang, Rao Kejin. *Electromagnetic Fields and Waves* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 202~203 (in Chinese)
谢处方,饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 202~203
- 6 M. C. Teich. Infrared heterodyne detection[J]. *Proc. IEEE*, 1968, **56**(1): 37~39
- 7 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Mechine Press, 2002. 256~258 (in Chinese)
郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 256~258

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自 2004 年 5 月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年 12 册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10 条,每篇不过 2000 字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的 80% 优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费 2800 元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款 2800 元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户 名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐 号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn