

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0183-04

高斯本振光和爱里斑信号光相干探测的外差效率

王 骐, 王春晖, 尚铁梁

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 假定激光外差探测系统的光信号体制是高斯本振光和爱里斑信号光。在该物理模型下,详细分析了外差探测特有的附加损耗因子——外差效率。建立它们的数学模型,数值仿真非准直效应、光场振幅分布、空间角失配、本振光等相面弯曲等因素对外差效率的影响程度,并且指出非准直效应和空间角失配是造成外差效率下降的主要因素。为此,提出控制高斯本振光的光束参数,降低激光外差光学系统准直的难度。在理想状态下,高斯本振和爱里斑信号外差效率的理论上限为0.82。

关键词 激光技术; 相干探测; 外差效率; 激光雷达; 高斯光束; 爱里斑

中图分类号 TN247

文献标识码 A

Heterodyne Efficiency of Coherent Detection with Gaussian Local-Oscillator and Airy Spot Signal Beam

Wang Qi, WANG Chun-hui, SHANG Tie-liang

(National key Laboratory of Tunable laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150006, China)

Abstract Hypothesis the beam signal model of laser heterodyne detection system is Gaussian local-oscillator beam and Airy spot signal beam in this context. With this physical model, analysis in detail a particular additional consumption gene in heterodyne detection heterodyne efficiency. Establishing their math model, discussion the surface curve including non-collimation influence of numerical value simulation, swing distributing of optic field, non-matching angle of dimensional and local-oscillator light, etc, affect the degree of heterodyne efficiency, and that the main factors can cause heterodyne efficiency to decline are non-collimation influence of numerical value simulation and non-matching angle of dimensional. So, controlling the beam parameter is put forward, and non-collimation difficulty of laser heterodyne optic system is declined. In ideal status, the upper limit of heterodyne efficiency of Gauss local-oscillator and Airy spot signal is 0.82.

Key words laser techniqe; coherent detection; heterodyne efficiency; laser radar; Gaussian beam; Airy spot

1 引言

激光外差探测是公认的量子限探测技术。相关文献和实验数据表明^[1],激光的直接探测方式最小可探测功率一般在 10^{-9} W 量级,外差探测可实现近量子限探测(在 10^{-11} W 量级以上)。可见,外差探测灵敏度比直接探测高几个数量级,但是外差探测技术的难度也比直接探测高得多。例如,外差探测时发射激光器和本机振荡激光器均要求单纵模(EH₁₀),频率稳定性至少要在 10^{-8} 以上。激光外差探测系统存在一项它所特有附加损耗因子,也称之为外差效率(或叫混频效率)。因此,外差效率是评价外

差探测系统性能的重要参数指标之一。外差效率($\eta \leq 1$)主要受这几种因素影响:发射光束和本振光束的波形形状、振幅分布、位相差、偏振态和本振光光强。所以,提高系统的外差效率,就必须深入了解和研究本振光和信号光振幅、位相、偏振、本振光强的匹配及光学系统准直问题。否则,如果失配比较严重,外差探测的灵敏度并不比直接探测高,甚至于可能低于直接探测。

近年来,8~14 μm 长波红外波段的光参量放大激光器(OPO)、量子级联半导体激光器(QCL)发展飞速^[2,3],与此同时采用折叠腔技术、射频激励技术等新技术改进传统的 10.6 μm 波导 CO₂ 激光器,使

它的体积大幅度下降^[4]。长波红外激光最具魅力的优势是,它在战场烟雾等恶劣环境下大气传输性能比 1.06 μm YAG(或 DPL)高得多,基本上不受能见度的影响,同时它的相干长度长,是最容易实现外差探测的激光波段。因此,可以预言,未来长波红外激光外差探测技术将更加广泛地用于激光成像制导、激光空间通讯、激光空间对接以及激光空间侦察等军事领域。

2 高斯本振光和爱里斑信号光的外差效率

在激光外差探测系统中,把本振光近似成高斯光束,信号光为圆孔夫琅和费衍射爱里斑,是比较接近实际情况的外差探测光信号物理模型。这时,假设高斯本振光和爱里信号光具有相同的偏振态,那么两束光的光场就都可以写成标量形式,即^[5,6]

$$\begin{cases} U_{\text{LO}}(r_1^m, t) = \frac{C_{\text{LO}}}{W(z)} \exp\left[-\frac{r_1^2}{W(z)}\right] \times \\ \exp\left\{i\omega_{\text{LO}}t - i\left[k\left[z + \frac{r_1^2}{2R(z)}\right] + \phi(z)\right]\right\} \\ U_{\text{S}}(r_2^m, t) = C_{\text{S}} \left[J_1\left(\frac{\pi r^2}{\lambda F}\right) \right] \left/ \left[\frac{\pi r^2}{\lambda F} \right] \right. \times \\ \exp[i(\omega_{\text{S}}t - k^m \cdot r_2^m)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\omega_{\text{S}}, \omega_{\text{LO}}$ 分别是信号光和本振光的角频率; k 为光的传播常数; $\phi_{\text{S}}, \phi_{\text{LO}}$ 分别为信号光和本振光的初相位; r_1^m, r_2^m 分别为本振光和信号光的位置矢量; $R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$ 为高斯本振光在纵坐标 z 处等相面的曲率半径; $w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$ 为高斯本振光在纵坐标 z 处的模场半径; $F = D/f$ 为光学系统的“ F ”数; D, f 分别为其有效孔径和焦距; J_1 为一阶贝塞尔函数。

则在该数学物理模型条件下,外差效率就是本振光光场 U_{LO} 和信号光光场 U_{S} 归一化卷积,即

$$\eta_{\text{het}} = \frac{\left[\int_S U_{\text{LO}}(r_1^m) U_{\text{S}}(r_1^m + r_2^m) dS \right]^2}{\left[\int_A \eta(r) |U_{\text{LO}}(r_1^m)|^2 dS \times \int_A |U_{\text{S}}(r_2^m)|^2 dS \right]} \quad (2)$$

式中 S, A 分别为本振光与信号光重叠面积和光探测器光敏面积; $\eta(r)$ 为光探测器光敏面(r 极坐标点处)的量子效率,它是光敏面的位置函数,如果是均匀的,则 $\eta(r) = \eta$ 为常数。(2)式中自变量 r 用矢量形式,表示该符号既含有幅度又含有位相。

3 高斯本振和爱里斑信号匹配准直的建模和数值仿真

下面将分别考虑上述两束光场的偏振态、振幅分布、位相差及光学系统空间对准(准直)几种情况,建立振幅匹配、位相匹配的数学模型,通过数值仿真,分析激光外差探测的附加损耗因子——外差效率,给出外差探测系统的最佳场匹配和光学系统对准的解决方案。

两束光的偏振态匹配实现起来比较容易。在外差探测系统设计中,光学系统采用“布鲁斯特窗片+ $\lambda/4$ 波片+ $\lambda/2$ 波片”等光学元件,使发射光束、接收光束和本振光束的偏振态得到校正,最终在光探测器敏感面上使本振光和信号光达到完全相同的偏振态^[7]。

两束光的振幅匹配包括振幅分布和光轴准直两部分内容: 1) 即便两束光完全对准(如图 1 所示),但由于两束光的振幅分布不同,其最大外差效率也不等于 1,通过上面给定的物理数学模型可计算它的理论最大值; 2) 实际使用中的光学系统往往处于失准状态(如图 2 所示)。失准状态包括两束光光轴的平移和倾斜,把光轴平移归在振幅匹配问题中,把光轴倾斜归在下面的位相匹配这一类问题当中。

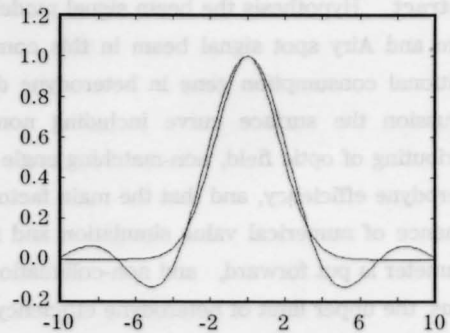


图 1 高斯本振光和爱里信号光完全匹配的情况

Fig.1. completely matching Gauss local-oscillator beam and Airy spot signal beam

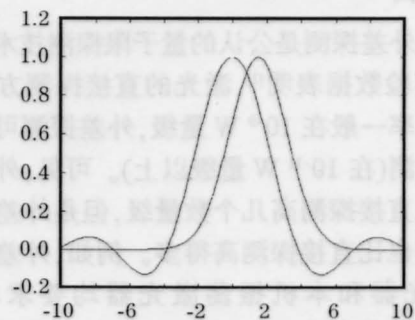


图 2 高斯本振光和爱里信号光光轴平移的情况

Fig.2. Gauss local-oscillator beam and Airy spot signal beam parallel moving along light axes

将公式(1)给出的高斯本振光和爱里斑信号数学模型代入(2)式,经过数学演算得到以下完全匹配

和光轴平移时的外差效率数学模型:

$$\eta_{\theta=0}=(8/\Omega^2)[1-\exp(-\Omega^2/4)]^2, \tag{3}$$

$$\eta_x=2 \frac{\left[(1/\pi\Omega) \int_0^{x_0} \int_0^{2\pi} J_1(x) \exp\left(-\frac{x^2+x_{01}^2-2xx_{01}\cos\varphi}{\Omega^2}\right) dx d\varphi \right]^2}{1-\exp(-2x_0^2/\Omega^2)} \tag{4}$$

式中

$$\Omega = \frac{\pi w_0}{\lambda F}, \quad x_0 = \frac{\pi r_0}{\lambda F}, \quad z = \frac{r}{w},$$

r_0 为光探测器光敏面的半径, x_{01} 为两束光光轴平移量。

③ 利用 MATLAB6.1, 可直接对公式(3)进行数值积分, 仿真结果如图 3 所示。从图 3 可得到以下结论: 在振幅匹配情况下, 外差效率仅与高斯本振光的束腰半径 w_0 和成像物镜的“ F ”数有关, 且存在某一最佳值, 即当 $w_0 F \approx 0.71\lambda$ 时, 外差效率最大 $\eta_0 \approx 0.82$ 。

在实际外差探测系统中, 即便高斯本振光和成像物镜的参数满足图 3 的仿真结果, 在外差系统光

路调整中很难把两束光调到如图 1 所示的结果, 也可以说基本上做不到这一点。通常情况下, 外差系统的光路调整到图 2 的结果, 就认为已经很不错了。但是两束光光轴微小平移, 却使整个系统的外差效率下降很多。为了说明其原因, 必须计算(4)式的卷叠积分。在仿真精度要求不是很高的情况下, 采用蒙特卡罗(Monte-Carlo)方法计算(4)式不规则面积的数值积分, 程序编写简单, 但计算量却非常之大。图 4 给出了当光轴平移时外差效率随平移量 x_{01} 变化而变化的数值仿真结果。由图 4 可见, 光轴微小平移就可造成外差效率急剧下降。为了避免图

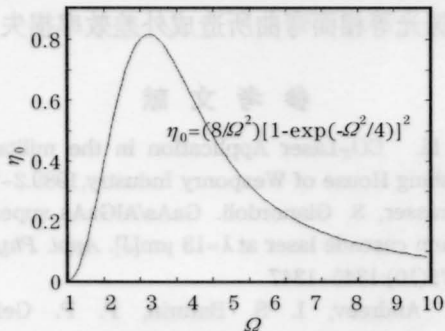


图 3 理想状态下外差效率随本振光光束参数 Ω 变化的数值仿真结果

Fig.3 Numerical value simulation result that heterodyne efficiency change with parameter of local-oscillator beam Ω difference in ideal status

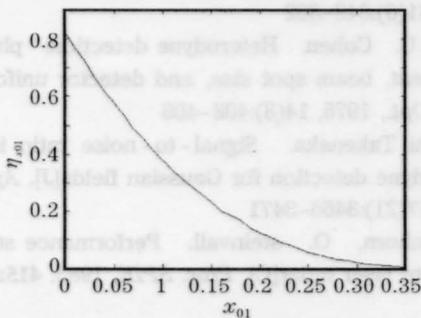


图 4 两束光光轴平移情况下外差效率随平移量 x_{01} 增加而下降的数值仿真结果

Fig.4 In umerical value simulation result that heterodyne efficiency of two beams in parallel moving decline with x_{01} axes increase

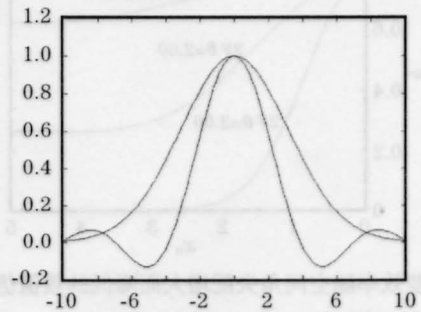


图 5 高斯本振光和爱里信号光不同分布参数和光轴准直的情况

Fig.5 In the case of light axes collimation and difference of distributing parameter of Gaussian local-oscillator beam and Airry spot signal beam

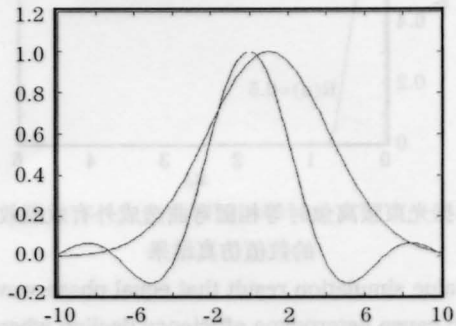


图 6 高斯本振光和爱里信号光不同分布参数及光轴非准直的情况

Fig.6 In the case of non-collimation of light axes and difference of distributing parameter of Gaussian local-oscillator beam and Airry spot signal beam

1~图 4 非好即坏的两个极端情况的发生,设计了图 5 和图 6 的模拟结果,通过增大高斯本振光的光斑同时也改变了它的振幅分布(即偏离本振光最佳振幅分布),降低光路的准直难度,这样虽然也降低了系统的外差效率,但是外差效率的降低却可控制在可容忍的范围之内。

高斯本振光和爱里信号光位相匹配主要包括:

1) 两束光的空间角匹配;2) 高斯本振光束腰偏离光探测器光敏面时的等相面弯曲。考虑(1)式模型中高斯光和爱里斑的光传播矢量 k 不平行的情况,以及高斯本振光束腰不在光探测器光敏面上,本振光在光敏面上不是平面波,即它的等相面弯曲。经过数学演算,外差效率与空间失配角(及等相面曲率半径 R 的数学模型为^⑥

$$\eta_{\theta} = 2 \left[\frac{2}{\Omega} \int_0^{x_0} J_1(x) \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega^2}\right) J_0(2F\theta x) dx \right]^2 / [1 - \exp(2x_0^2/\Omega^2)], \tag{5}$$

$$\eta_R = 2 \left[\frac{2}{\Omega} \int_0^{x_0} J_1(x) \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega^2}\right) \cos\left[\frac{kr^2}{2R(z+\Delta z)}\right] dx \right]^2 / [1 - \exp(-2x_0^2/\Omega^2)], \tag{6}$$

公式(5),(6)中的 J_0, J_1 分别为零阶和一阶贝塞尔函数,而分子为振荡函数奇异积分,它没有解析解,只能进行数值解。采用高斯-洛巴托数值积分方

法, MATLAB6.1 编程,给出图 7 和图 8 的数值仿真结果。

图 7,图 8 给出的数值仿真结果显示,空间失配角对 η 的影响很大, θ 应控制在 $0 \sim 1.22\lambda/\pi r_0$ 之间。本振光等相面弯曲同样使 η 降低,但影响程度低于空间角失配的影响。考虑成像物镜大景深设计,可降低本振光等相面弯曲所造成外差效率损失。

参 考 文 献

- 1 Jian Li. CO₂ Laser Application in the military [M]. Publishing House of Weaponry Industry, 1989. 2~7, 59~64
- 2 G. Strasser, S. Gianordoli. GaAs/AlGaAs super lattice quantum cascade laser at $\lambda=13 \mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(10):1345~1347
- 3 Yu M. Andreev, I. S. Baturin, P. P. Geit *et al.*. Frequency doubling of CO₂-laser radiation in new nonlinear crystal AgGa₂In_{1-x}Se₂ [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1999, 29(1):66~70
- 4 Wang Qi, Tian Zhaoshuo, Wang Yushan. Tunable electrooptically Q-switched RF excited CO₂ wave guide laser with two channels [J]. *Infrared Phys. & Technol.*, 2000, 41(6):349~352
- 5 Steven C. Cohen. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity [J]. *Appl. Opt.*, 1975, 14(8):402~408
- 6 Takashi Takenaka. Signal-to-noise ratio in optical heterodyne detection for Gaussian fields [J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17(21):3466~3471
- 7 I. Renhorn, O. steinvall. Performance study of a coherent laser radar [C]. *Proc. SPIE*, 1983, 415:39~50

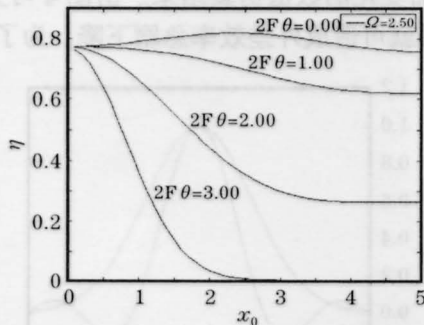


图 7 外差效率随空间角失配增大而降低的数值仿真结果
Fig.7 Value simulation result that heterodyne efficiency decline with non-matching angle of dimensional increase

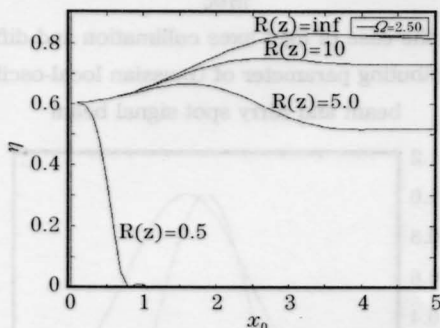


图 8 本振光束腰离焦时等相面弯曲造成外有效效率降低的数值仿真结果

Fig.8 Value simulation result that equal phase wave front curved cause heterodyne efficiency decline when LO-beam without crossover defocus