

光折变自适应光外差探测系统理论研究*

李晓春 过巴吉 汪家友

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘 要 首次对光折变自适应光外差探测系统的工作状态进行了较全面分析。给出了系统的最小可探测信号功率和可提供的参考光功率, 指出了影响系统特性的关键参数。

关键词 光折变相位共轭器, 自适应光外差探测。

1 引 言

在光外差检测中不但要求所提供的参考光必须与入射信号光偏振方向平行, 而且还要两者能流矢量相平行, 波前曲率相匹配, 因而实际上要实现光外差探测是十分困难的。为解决这一关键技术困难, 1988年美国Alabama大学的Shamir^[1]等人提出一种设想, 计划把光折变相位共轭技术应用于光外差检测中, 从而构成一种称之为“自适应光外差探测”的系统。但是, 自从这一设想被提出之后, 就不再见到国内外任何有关此方面研究工作的进一步报道。

本文将提出一种更加简化形式的光折变自适应光外差探测系统, 分析它的工作状态, 给出该系统的最小可探测信号功率和输出参考光强度, 最后讨论影响系统特性的关键参数。

2 系统结构与原理

在Shamir等人最早提出的光折变自适应光外差探测系统中^[1], 有一块光折变晶体作双相位共轭之用, 而另一晶体则工作于四波混频状态, 本文提出一种更简单易调整的自适应光外差探测系统, 如图1所示。在该图中, 两光折变晶体现都工作于双相位共轭状态。在图1中, 光1为一弱的时域调制信号光, 在其到达探测器D之前, 其一部分能量(光2)被分束器BS₁导向光折变晶体PR₁, 通过PR₁中的双相位共轭过程, 就可以使得来自本地激光器的光3具有了信号光的共轭波前, 光3透过分束器成为光4, 经PR₂再一次共轭又产生光4的共轭光5。可见, 光5实际上为信号光1的两次共轭波, 它除了不携带信号光的时域信息外, 其波前形状完全同于信号光, 因而其在分束器BS₁上的反射光(光6)能够与透射的信号光(光7)完全匹配地相干迭加, 从而在探测器D上产生最大的外差检测中频输出信号。

3 系统工作状态分析

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1994年4月8日; 收到修改稿日期: 1994年6月21日

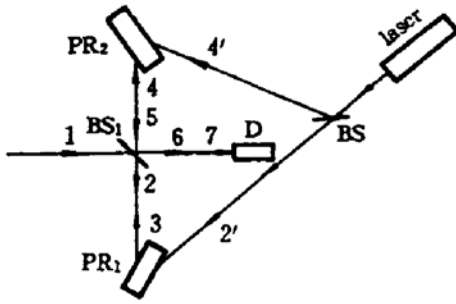


Fig. 1 Sketch of a simplified adaptive optical heterodyne detection system

由图 1 可知, 实际上 PR_1 、 PR_2 构成了一种新型的光学谐振腔, 它与普通的激光谐振腔最大不同之处, 就在于其“增益介质”分为两块且位于腔体两端、而功率输出镜则置于腔体中央。当外差系统正常工作时, 提供给两晶体的泵浦光(光 $2'$ 、 $4'$)功率 P_2 、 P_4 应该是恒定的。令这两个功率值之比为

$$Q = P_4/P_2, \quad (1)$$

称 Q 为系统的总光功率之比, 简称总光比。

记两晶体的共轭反射率分别为 R_1 、 R_2 , 那么光在谐振腔内往返一周得到的净增益为

$$G = R_1 R_2 T_s^2 \quad (2)$$

式中 T_s 为分束器 BS_1 的透过率。从理论上说, 当光折变晶体参数(光束耦合强度、损耗因子等)确定时, 光折变双相位共轭镜的稳态共轭反射率将是两入射光功率之比的一元函数^[2,3]。在这里, 由于泵浦光功率 P_2 、 P_4 恒定, 那么共轭反射率 R_1 、 R_2 实际上就分别成为振荡功率 P_2 和 P_4 的一元函数:

$$R_1 = R_1(P_2), \quad R_2 = R_2(P_4) \quad (3)$$

据此并再经一些简单推导, 便可将增益 G 化为仅含一个振荡功率 P_2 的函数形式:

$$G = G(P_2, T_s) \quad (4)$$

与分析一般振荡器一样, 令腔内净增益等于 1, 那么通过解下面以 T_s 为参数的关于 P_2 的方程

$$G(P_2, T_s) = 1 \quad (5)$$

就可以得到在平衡振荡时各光束的功率值。

关于双相位共轭过程, 至今人们已在不同的晶体中实现了几种不同作用形式的双相位共轭镜^[4], 以单作用区双相位共轭镜为例, 利用文献[2,5]中求得的共轭反射率结果, 来分析讨论自适应外差检测系统的工作状态。

假定两晶体的非线性耦合强度相等, 为 $\gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2 = 4$, $T_s = 0.5$, 求得的平衡振荡光功率 P_2 随系统总光比 Q 之间的变化关系曲线如图 2 所示。由图 2 可见, 1) 为维持系统正常振荡, 总光比 Q 必须处于某一确定的限定范围, 在此范围之外, 整个系统不工作; 2) 在总光比 Q 允许范围内, 振荡光强曲线分上下两支, 即方程(5)式呈双解。系统总光比 Q 限定范围的存在实际上是由两双相位共轭镜在正常工作时均存在一特定的光功率比的允许范围^[5]而引起的。可以证明, 对于图 1 所示外差系统的正常工作来说, Q 必须满足下式:

$$1/T_s q_{1max} < Q < T_s q_{2max} \quad (6)$$

式中 q_{1max} , q_{2max} 分别为晶体 PR_1 , PR_2 的最大允许光功率之比。但需指出: (6)式所给出的 Q 限定范围还相当宽松, 要比实际允许的范围大。

图 3 为根据(4)式求得的典型情况下参考光谐振发生器的增益与振荡功率 P_2 间的关系曲线。可以看出, 在一般情况下的确有两个状态 A 和 D 满足振荡器的平衡振荡条件(5)式。然而由于这两个点的稳定性截然不同, 因而它们所代表的状态具有完全不同的物理意义。

假设初始时谐振腔工作于态 D, 在某时刻由于某种扰动因素使得谐振腔的振荡功率增

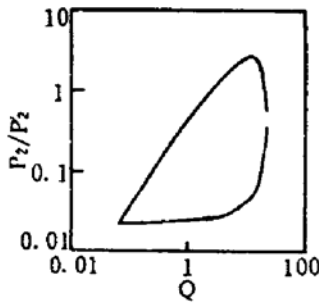


Fig. 2 The dependence of equilibrium oscillating power P_2 on system global power ratio Q ($\gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2 = 4$, $T_s = 0.5$)

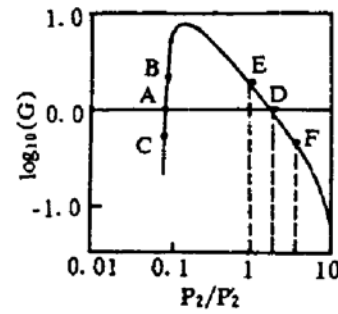


Fig. 3 Light full trip net gain G as a function of oscillating power P_2 for reference beam oscillator ($Q = 16$, $T_s = 0.5$) $\gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2 = 4$

大, 工作点由平衡态 D 移至态 F, 那么这将会导致腔内净增益小于 1 (见图 3), 因此振荡功率会随之减小, 结果工作点又会返回 D; 同样, 当工作点偶然由 D 左移至 E 时, 则由于增益变得大于 1 而将导致振荡功率随之增大, 结果工作态又返回原来位置 D。由此可见: 平衡态 D 是一个稳定平衡态。而状态 A 则不同。通过与上类似的分析不难发现, 态 A 实际上是谐振系统能够起振与否的分界点, 是非稳定平衡的。这样在图 2 中的上下两支曲线中, 只有与态 D 对应的上支才表示真正可以实现的振荡功率, 而下支所代表的物理状态实际上是不可实现的。

假设态 A 对应的振荡功率为 P_{20} , 定义如下一个参量:

$$P_{in} = P_{20}/(1 - T_s) \quad (7)$$

由上述的稳定性分析可知, 该量的物理意义就在于: 若输入信号功率大于 P_{in} , 则图 1 所示的参考光谐振发生器能够顺利起振, 当振荡状态稳定之后, 输出一个功率恒定的参考光 (由态 D 决定); 相反, 若输入信号功率小于 P_{in} , 则参考光发生器不能正常工作。称 P_{in} 为自适应外差探测系统的最小可探测信号功率。

假设态 D 对应的振荡功率为 P_2 , 那么易得系统参考光的输出功率为

$$P_{out} = (1 - T_s)P_2/T_s \quad (8)$$

最后需指出, 上面所定义的“最小可探测信号功率”, 实际上是在不计入系统噪声时由于振荡腔的工作特性而加于整个外差系统的一个阈值参量。若考虑到噪声影响, 则系统的实际最小可探测功率还要大一些。

4 总光比及晶体特性对系统特性的影响

这一部分中将给出一些典型的数值计算结果, 以求对外差系统有一定量了解。

4.1 系统总光比对最小可探测功率及输出参考光功率的影响

图 4 示出了一般情况下系统的最小可探测信号功率及输出参考光功率随系统总光比的变化关系曲线。在计算中取两晶体的非线性耦合强度 $\gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2 = 6$, $T_s = 0.5$ 。由此图可以看出: 输出 P_{out} 对总光比 Q 来说存在一最优值 Q_{opt} , 在 $Q > Q_{opt}$ 时随着总光比 Q 的增大, 输出 P_{out} 很快下降而最小可探测功率 P_{in} 迅速增大; 在 $Q < Q_{opt}$ 时, P_{out} 随着 Q 的增大而指数增大, 但 P_{in} 基本保持不变。据此规律, 可很容易对系统总光比进行优化设置, 即只要

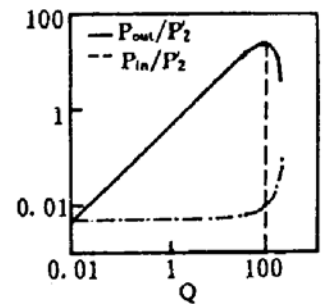


Fig. 4 Reference beam output power and minimum detectable signal power as a function of system global power ratio ($\gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2 = 6$, $T_s = 0.5$)

使得 Q 等于 Q_{opt} 或稍小一些, 则系统输出最大而最小可探测功率又基本接近其下限最小值, 系统性能达最优。比如在图 4 的例子中, Q 就应取值于 20~100 之间。

4.2 晶体非线性耦合强度对系统特性的影响

假设两晶体的非线性耦合强度相等, 记为 γL , 图 5 给出了 γL 取不同值时系统的特性曲线。可见, 随着光折变晶体光束耦合强度的增大, 总光比 Q 的限定范围随之拓宽, 外差系统参考光输出功率迅速增大, 而系统最小可探测功率很快下降。

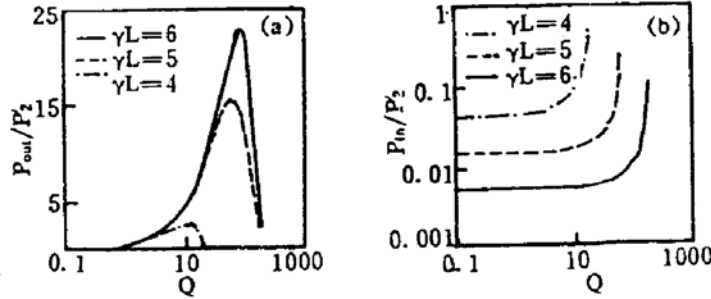


Fig. 5 The effect of crystal coupling strength on reference beam output power (a) and minimum detectable signal power (b) ($T_s = 0.5$)

4.3 晶体 PR₁ 与 PR₂ 分别对外差系统特性的影响

图 6 给出了两晶体的耦合强度值在不同的组合情况时外差系统的特性曲线, 可以看出: 晶体 PR₁ 与 PR₂ 在整个系统中表现出不同的特性, 起着不同的作用, 具体表现为: 晶体 PR₂ 的特性参数主要影响着自适应外差系统总光比 Q 的允许范围及参考光的输出功率大小, 而系统的最小可接收功率主要由晶体 PR₁ 特性参数来决定。

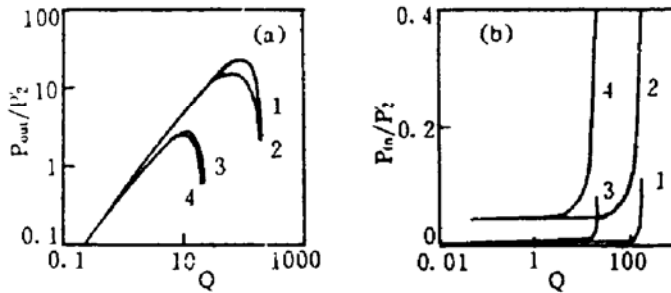


Fig. 6 The two important system parameters, P_{out} and P_{in} , vary with respect to Q for different combinations of $\gamma_1 L_1$ and $\gamma_2 L_2$. corresponding to the four curves, the four sets of $(\gamma_1 L_1, \gamma_2 L_2)$ are as following: 1: (6, 6); 2: (4, 6); 3: (6, 4); 4: (4, 4). $T_s = 0.5$

4.4 系统最小可接收功率与晶体特性的关系

Table 1 Several characteristic parameters of the photorefractive adaptive optical heterodyne detection system

$P_2 = 10 \mu W, \gamma L = \gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2, T_s = 0.5$				
coupling strength γL	global optical power ratio (optimum) Q	required local laser output power (W)	minimum detectable signal power (W)	produced reference beam output (W)
4	6	70×10^{-6}	0.6×10^{-6}	20×10^{-6}
6	70	0.7×10^{-3}	80×10^{-9}	0.2×10^{-3}
10	1000	10×10^{-3}	1×10^{-9}	5×10^{-3}

假设 $P_2 = 10 \mu\text{W}^{[6]}$, Q 按上述方法取最优, 表 1 给出了按照目前的材料性能水平, γL 取不同值时外差系统的若干特性参数举例。今后随着光折变材料性能的提高和各种光束耦合强度增强技术^[7]的出现与应用, 晶体能提供的非线性耦合强度会不断增大, 自适应外差系统性能就会随之不断提高。图 7 根据理论计算, 给出了系统的最小可接收功率随晶体非线性耦合强度值的变化关系曲线, 由图可见: 系统最小可接收功率随耦合强度的增大而指数减小, 耦合强度大约每增加 2.3, 最小可探测功率就降低一个数量级。

总结 本文对一种简单的光折变自适应光外差探测系统的工作特性进行了详细分析, 得到了最小可探测功率与光折变晶体光束耦合强度间的定量关系, 明确了光折变晶体在系统中的关键作用。所给结果对如何有效地实现自适应外差系统提供了理论依据。

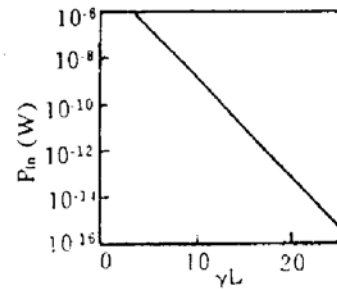


Fig. 7 Minimum detectable signal power as a function of nonlinear coupling strength γL ($\gamma L = \gamma_1 L_1 = \gamma_2 L_2$, $T_s = 0.5 P_2 = 10 \mu\text{W}$)

参 考 文 献

- [1] J. Shamir, H. J. Caalfield, B. M. Hendrickson, Wavefront conjugation and amplification for optical communication through distorting media. *Appl. Opt.*, 1988, 27(14): 2912~2914
- [2] M. Cronin-Golomb, B. Fischer, J. O. White *et al.*, Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, QE-20(1): 23~25
- [3] M. D. Ewbank, R. A. Vazquez, R. R. Neurgaonkar *et al.*, Mutually pumped phase conjugation in photorefractive strontium barium niobate; theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7(12): 2310~2312
- [4] M. D. Ewbank, R. A. Vazquez, R. R. Neurgaonkar *et al.*, Mutually pumped phase conjugation in photorefractive strontium barium niobate; theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7(12): 2306
- [5] S. Weiss, S. Sternklar, B. Fischer, Double phase-conjugate mirror; analysis, demonstration and applications. *Opt. Lett.*, 1987, 12(2): 114
- [6] 王凡, 张以谟, 采用自泵浦相位共轭镜的光学关联存储器. *光学学报*, 1992, 12(1): 50
- [7] J. E. Millerd, E. M. Garmire, M. B. Klein, Self-pumped phase conjugation in InP: Fe using band-edge resonance and temperature stabilization; theory and experiments. *Opt. Lett.*, 1992, 17(2): 100

Study of a Photorefractive Adaptive Optical Heterodyne Detection System

Li Xiaochun Guo Siji Wang Jiayou

(Department of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 8 April 1994; revised 21 June 1994)

Abstract In this paper, the theoretical analysis of a photorefractive adaptive optical heterodyne detection system is presented for the first time. We find out the minimum detectable signal power and the produced reference beam output. Several key factors which affect the system characteristics strongly. are pointed out.

Key words photorefractive phase-conjugate mirror, adaptive optical heterodyne detection.