

外差探测系统的相位匹配研究

何毅

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

摘要 从外差探测系统设计的基本要求出发,分析本振光与信号光的相位匹配技术。表明当目标回波聚焦像斑与本振光聚焦像斑不重合时,像斑大小直接影响信号幅度,波长越短,相位匹配越困难。系统发射的探测光束发散角较大时,信噪比较差,且光束扫过点目标可能出现条纹状信号过程。分析所得主要结论得到了实验验证。

关键词 外差探测,相位匹配

1 引言

近二十五年来,光波段的外差探测技术得到迅猛发展,一批相干式激光雷达系统相继建立^[1~3]。八十年代针对不同类型目标和大气条件的雷达信噪比及信号统计分布等专题得以充分研究^[4~6]。从激光大气通信中发展起来的相干探测匹配技术^[9]被直接应用到激光雷达中。然而激光雷达探测的目标表面大多是粗糙的,回波波前只能用统计方法来描述,很少有专题研究这种随机相位匹配的文献报道。

外差探测通过本振光波与目标散射回波的匹配混频来提取信息。这种匹配过程可以分解为三个技术分支,即相位匹配、振幅匹配和偏振态匹配。其中振幅匹配较容易实现,选择适当的本振功率即可达到较好的效果。偏振态匹配也不困难,许多激光雷达均采用“布儒斯特片 + $\lambda/4$ 波片”收发隔离光开关完成对回波偏振态的校正^[1],使本振光与信号光具有完全相同的偏

振态。相对而言相位匹配是最困难的,对信噪比的影响也最大。下面的分析将表明,失败的相位匹配可以让即使很强的回波也没有信号输出。

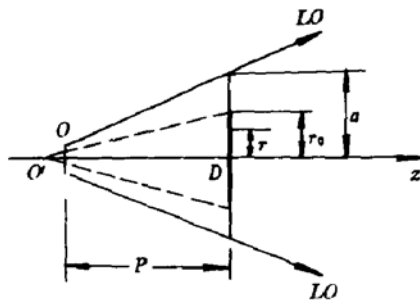


图1 本振光和信号光匹配示意图

Fig. 1 Phase matching between the local oscillator and the signal wave

2 理论分析

2.1 基本理论

如图1,光学系统把本振光 LO 聚焦,腰斑在 O 处,光腰半径 W_0 由系统参数决定。目标回波聚焦像斑分布在光敏面 D 上半径为 r_0 的范围内,并与这一范围的本振光波混频。探测器光敏面半径为 a , O 和

D 都处于光学系统几何焦点附近, 且 D 与光轴 E 垂直, D 不一定在目标光学成像位置. p 是 O 与 D 的距离, 对于大多数实际状态, p 不等于零. 就基模激光束而言, 本振光波前在光腰位置 O 处是等相位的, 可以作为本振光相位参考点. 由此, D 上本振光可记为

$$E_L(r, \phi, t) = A_L(r, \phi, t) \exp\{i[\omega_L t + \Delta\varphi(r, \phi, t)]\} \quad (1)$$

A_L 为电场幅度, ω_L 为本振光频率, $\Delta\varphi$ 为从 O 到 D 上一点 (r, ϕ) 的相位改变量, (r, ϕ) 为 D 上某点的极坐标, 图 1 中未给出 ϕ . 光敏面轴上点波前半径为

$$R(p) = p[1 + (W_0^2 k/2p)^2] \quad (2)$$

光敏面 D 接收到的信号光, 可以视为探测光束照明区域内, 不同部位面元独立散射的场的相干叠加, 即

$$E_S(r, \phi, t) = \sum A_{s_n}(r, \phi, t) \exp\{i[\omega_{s_n} t + \varphi_{s_n}(r, \phi, t)]\} = A_S(r, \phi, t) \exp\{i[\omega_S t + \varphi_S(r, \phi, t)]\} \quad (3)$$

A_{s_n} 和 φ_{s_n} 分别为第 n 个面元后向散射光的幅度和相位. ω_S, A_S, φ_S 分别为合成信号光的频率、幅度和相位. 考虑到目标几何形状和表面粗糙度, 以及大气对信号光的影响, 通常相位复矢振幅 E_S 是一个圆型高斯随机复变量^[10].

由(1)和(3)可得 t 时刻光敏面 D 上的总场强

$$E(r, \phi, t) = E_S(r, \phi, t) + E_L(r, \phi, t) \quad (4)$$

因为探测器只能响应光强度的变化, 于是得探测器输出信号幅度

$$i(t) \sim I(t) = E(r, \phi, t) \cdot E^*(r, \phi, t) = 2A_S(r, \phi, t)A_L(r, \phi, t)\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(r, \phi, t) - \Delta\varphi(r, \phi, t)] + A_S^2(r, \phi, t) + A_L^2(r, \phi, t) \quad (5)$$

滤出 A_S^2 和 A_L^2 所产生的直流信号, 即得

$$i(t) = 2\alpha \iint_D A_S(r, \phi, t)A_L(r, \phi, t)\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(r, \phi, t) - \Delta\varphi(r, \phi, t)]rdrd\phi \quad (6)$$

式中 $\alpha = \eta e/h\nu$ 为探测器响应因子, η 为量子效率, e 为电子电荷, $h\nu$ 为光子能量, 积分范围包括整个光敏面.

2.2 外差探测分析

由于信号光各参量的随机性, 因此要精确计算(6)式是不可能的. 但是绝大多数外差探测系统都满足条件: (1) 信号光与本振光在光敏面 D 上是相干的; (2) 入射到光敏面上的信号光功率比本振光功率小得多. 因而 t 时刻光敏面上的光场可以理解为由信号光斑纹图样与相干背景(即本振光)的叠加. 本振光功率远大于信号光功率, 意味着在 (r, ϕ) 点信号与本振合成光场的相位可以近似地用本振光的相位来替代^[10]. (6) 式简化为

$$i(t) = 2\alpha \iint_D A_S(r, \phi, t)A_L(r, \phi, t)\cos[(\omega_S - \omega_L)t - \Delta\varphi(r, \phi, t)]rdrd\phi \quad (7)$$

$$\text{其中 } A_L(r, \phi, t) = u_0(t)[W_0/W(p)]\exp[-r^2/W^2(p)] \quad (8)$$

$W(p)$ 为光敏面位置本振光束的 $1/e$ 半径, $u_0(t)$ 为轴上光振幅参量.

显然, 某一时刻探测器输出的信号幅度取决于信号光与本振光重叠区域内各面元贡献的代数和. 要使这种状态下输出信号达到最大, 需要满足的相位匹配条件是在有效积分区域内,

$$|\Delta\varphi(r_0, \phi, t) - \Delta\varphi(0, \phi, t)| \leq \pi \quad (9)$$

式中 $\Delta\varphi(r_0, \phi, t)$ 和 $\Delta\varphi(0, \phi, t)$ 分别是在像斑边缘及轴上点时的本振相位改变量. 考虑到 O 处本振光腰斑半径为 W_0 , 易得信号光像斑半径 r_0 和本振光波前半径 $R(p + \lambda/2)$ 应满足的临界条件

$$r_0 = [\lambda R(p + \lambda/2) - \lambda^2/4]^{1/2} \tag{10}$$

波前半径 $R(p + \lambda/2)$ 由(2)式计算。可见波长越短, r_0 越小, 相位匹配越困难。

在光敏面 D 上, 若信号光像斑分布半径超过(10)式决定的 r_0 , 则信噪比将下降, 因此设计光学系统时, 必须尽量提高像质, 弥散斑越小越好。当然, 若本振光在 D 上分布半径不超过 r_0 时, 也可以不影响信号幅度, 不过这样安排可能增大噪声, 信号光功率也有浪费。

利用(7)式, 可以证明若光敏面上本振光与信号光重叠区域内各自的功率不变, 则目标像斑与本振光腰斑位置重合($p = 0$)时, 探测器将输出最大信号, 这时信号光与本振光的相位是完全匹配的; 相反, 若 p 不为零, 使得从像斑中心到像斑边缘 $\Delta\varphi$ 改变了 2π , 这时探测器将输出最小信号, 信号光与本振光的相位匹配是失败的。

2.3 粗光束的外差探测

对于粗光束外差探测, 有效接收视场应略大于光束远场发散角。如果所探测的目标是面目标, 像斑分布范围大于(10)式给出的范围, 信噪比就会很快下降, 甚至没有信号输出。图 2 是取本振光腰斑半径为 0.05 mm 时, 像斑大小变化引起探测器输出的最大信号归一化幅度变化示意图。

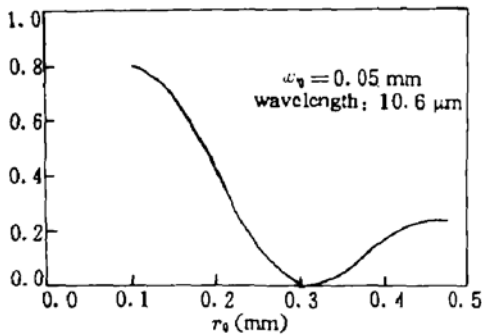


图 2 像斑增大引起归一化输出信号变化
Fig. 2 The signal wave speckle size decides the output amplitude

计算时把本振光近似为均匀球面波, 并假定系统无像差, r_0 由远场发散角决定, 目标各处后向散射系数相同, 总发射功率不变。可见, 随着光束发散角增大(r_0 也增大), 信号幅度很快降低, 甚至没有信号输出。更精确的计算还应该考虑本振光和信号光振幅的分布, 最大和最小值之间的差异要小一些, 但图 2 给出的拐点位置近似不变。此外, 假设目标光学成像位置与本振光腰斑位置重合, 调整光敏面的位置, 使 p 逐渐增大, 也可得到类似图 2 的信号幅度变化曲线。

还有一种重要的用途是用粗光束搜索或跟踪点目标。图 3 给出了这种应用的一个相位匹配特例示意图, 图 3(a) 表示光敏面上从轴上点到视场边缘 a 处本振光相位 $\Delta\varphi$ 改变了 2π , 点目

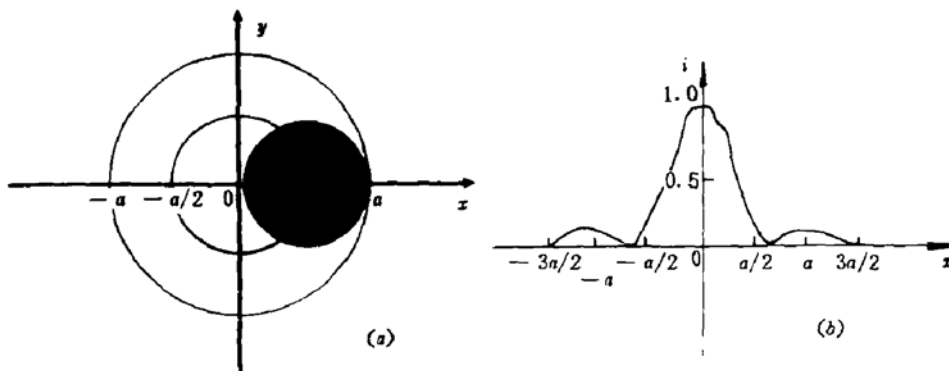


图 3 (a) 像斑和光敏面, a 处相位改变 2π ; (b) 条纹状信号过程

Fig. 3 (a) Diagram for the signal wave speckle on the sensitive element surface. $\Delta\varphi$ differs by 2π at location a ; (b) A streaky signal process

标的像斑直径等于 a 。这种特例下, 光束扫过点目标像斑将横穿光敏面, 图 3(b) 示出了这个过程输出信号幅度的变化情况, 这是一个条纹状信号过程。一般地, 若点目标像斑分布范围内的本振光相位改变量超过 π , 条纹状信号过程就会出现。

3 实验验证

根据上述分析, 若光敏面上信号光与本振光重叠区域内本振光相位改变量超过 π , 那么挡掉本振光的部分边缘, 使重叠范围减小, 信号幅度应该增大。对这个结论我们作了实验验证。所用系统是“八五”研制的 FMCW 体制相干式 CO_2 激光雷达光学天线(作用距离大于 4.5 km)。如图 4 所示, 激光器发出的平行于纸面的线偏振光束经预扩束器 BCT 扩束准直后完全透过布儒斯特片 BP, 再由 $\lambda/4$ 波片 QWP 变成圆偏振, 通过 X/Y 扫描器对目标进行扫描。QWP 与空气的第二界面所反射的弱光重新透出第一界面后, 变成垂直于纸面的线偏振, 这部分光用作本振光。目标散射回波再一次透过 QWP 后偏振态也有类似变化。BP 反射的部分本振和信号光, 通过透镜 L 聚焦到 HgCdTe 探测器上混频产生信号输出。探测器光敏面直径为 0.3 mm, 探测光束发散角为 0.18 mrad, 目标距离为 1048 m。实验时, 先把探测器调到某个相位失配位置, 得到信号输出如图 5 (a), 然后用圆孔形障碍物在 BCT 与 BP 之间切去光束的部分外边缘(探测光束功率随之略微减弱), 得到增大了的信号输出如图 5 (b)。信号带形状的差异是由于激光输出不是良好基模引起的。

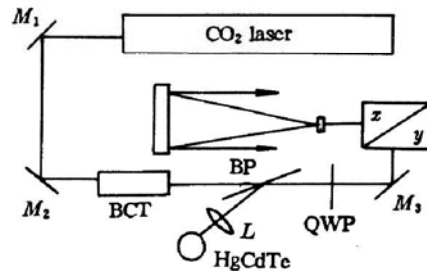


图 4 激光雷达光学天线示意图

Fig. 4 Diagram of the optical system of the laser radar

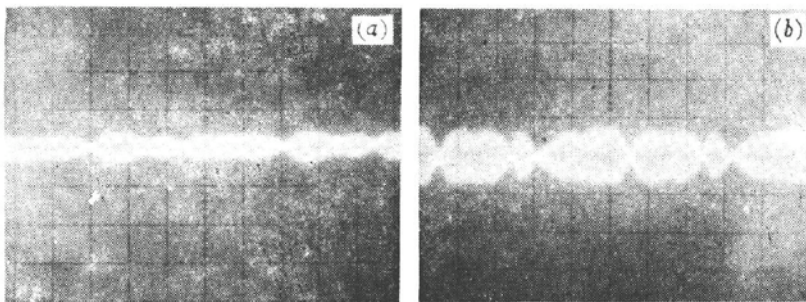


图 5 (a) 相位部分失配时的输出信号; (b) 挡掉本振光外圈后的输出信号

Fig. 5 (a) Phase partially mismatched signal band; (b) Signal band after the outer race of the LO is shielded off

4 讨论及结论

第 2 节从理论上分析了外差探测随机相位的匹配问题, 得出了取决于系统设计和调整参数的相位匹配条件(9)式和(10)式。结合这个条件, 并选取适当的本振光参数, 即可计算允许的系统综合像差大小。第 3 节介绍了用细光束作的验证实验, 证实了理论分析的正确性。有必要提及的是, 图 3 (b) 所示的条纹状信号过程, 在我们做 CO_2 激光雷达跟踪联调实验时, 也得以

证实,跟踪所用光束发散角为 0.4 mrad。

由(7)式导出(9)和(10)式,是在光敏面垂直于轴线且激光器输出为基模的条件下进行的,若光敏面与轴线有夹角或激光器输出是高阶模,情况将复杂得多。不过这个规则仍成立,即当光敏面上信号光与本振光重叠区域内本振光相变超过 π 时,信噪比就下降。当然通过平移探测器使光敏面适当偏离光斑位置,放弃部分回波功率,还是可能得到一定的信号幅度。我们还尝试过用细的准直光束作本振,在目标光学像位置附近得到了较好的输出信号。

致谢 作者衷心感谢“相干式 CO₂ 激光雷达关键技术”课题组各位专家和同事的大力协助,同时还要感谢冯 蓉同志对论文撰写修改工作的帮助。

参 考 文 献

- 1 J. L. Meyzonnette, G. Saccomani. Imaging CO₂ laser radar. A comparison of three techniques: LFM pulse compression, FMCW, CW. *SPIE*, 1988, **999**: 91~99
- 2 H. Ahlberg, S. Lundqvist, D. Letalick *et al.*. Imaging Q-switched CO₂ laser radar with heterodyne detection: design and evaluation. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17): 2891~2898
- 3 W. Kranz. Coherent laser radar for target classification. *SPIE*, 1991, **1479**: 270~274
- 4 J. Y. Wang. Heterodyne laser radar SNR from a diffuse target containing multiple glints. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(3): 464~467
- 5 J. Y. Wang. Statistical properties of multiple-glint targets under laser illumination. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(17): 2950~2955
- 6 J. Y. Wang, B. J. Bartholomew, M. L. Streiff *et al.*. Imaging CO₂ laser radar field tests. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2565~2571
- 7 D. Letalick, I. Renhorn, O. Steinvall. Measured signal amplitude distributions for a coherent FM-CW CO₂ laser radar. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21): 3927~3928
- 8 J. H. Shapiro. Target-reflectivity theory for coherent laser radars. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18): 3398~3408
- 9 T. Takenaka, K. Tanaka, O. Fukumitsu. Signal-to-noise ratio in optical heterodyne detection for Gaussian fields. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(21): 3466~3471
- 10 J. C. 丹蒂. 激光斑纹及有关现象(中译本). 北京: 科学出版社, 1981, 第二章

Phase Matching of a Heterodyne Detection System

He Yi

(Research Institute of Applied Physics, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract The phase matching technique between the signal and the local oscillator (LO) wave is analysed according to demands for the heterodyne detection system design. It shows that the focused signal wave speckle size dominates the output SNR when it doesn't coincide with the focused LO beam waist, and the phase matching becomes more difficult for the shorter wavelength. For large probe beam divergence the SNR is relatively poor, and even a streaky signal process is predicted if a point target is scanned across. The major conclusions from the analysis above are verified by an experiment.

Key words heterodyne detection, phase matching