

湍流大气中的激光外差探测

孙毅义

(中国科学院安徽光机所)

提要: 采用 $10.6\ \mu\text{m}$ 零拍外差接收方案, 进行了激光辐射空间相干性退化的检测。文中列出了外差效率与归一化接收孔径的关系曲线, 当接收孔孔径大于相干直径时, 随着归一化接收孔径增大, 外差效率将显著下降; 而当接收孔径小于相干直径时, 结果恰相反。

Laser heterodyne detection in turbulent atmosphere

Sun Yiyi

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The $10.6\ \mu\text{m}$ CO_2 homodyne receiving has been adopted for detecting deterioration of the spatial coherence of laser radiation. The relation between the heterodyne efficiency and normalization aperture of the receiver is presented. It is shown that the efficiency of the heterodyne receiver decreases with increasing of the normalization aperture when the aperture of the heterodyne receiver is larger than the coherence diameter, but the result is opposite when the aperture is less than the coherence diameter.

激光外差探测技术为长距离激光通信和激光雷达等工程提供了极灵敏的检测方法。然而, 除了外差接收机自身的技术困难外, 还因为湍流大气使在其中传输的激光束发生相位起伏及空间相干性退化, 严重影响了接收质量。

目前已有许多工作对湍流大气中的外差探测问题进行了理论和实验研究^[1~5]。我们在 7.8 公里光程上所作的实验研究表明, 在中等湍流条件下, $\phi 300\ \text{mm}$ 以下的接收孔径不会受大气湍流的很强烈的影响, 符合 D. L. Fried 的理论估算^[2]以及早期的一些实验结果^[4,5]。但当接收孔径继续增大, 或传输距离增加, 或外差接收机工作波长变短时, 湍流大

气对相干探测的影响多大, 能否实现外差探测, 至今尚无明确的实验验证。

1979 年夏秋之际, 在平坦的合肥机场草地上, 使用 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光零拍外差接收机研究了在不同湍流强度 ($C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \sim 3 \times 10^{-13}\ \text{m}^{-2/3}$) 下, 外差效率随归一化接收孔径变化的规律, 光程长度为 2.7 km (往返的总光程), 仪器离地高度平均为 1.5 m。

一、大气湍流对外差探测的影响

湍流大气对激光传输和相干接收机的影响是一个非常广泛的研究课题, 限于篇幅我

收稿日期: 1985 年 1 月 7 日。

们只讨论与外差探测有关的空间相干性的要求。

外差接收机对接收孔径上空间相干的信号具有最佳响应,但当激光辐射穿过折射率呈不规则变化的空气时,这一光束的波前发生畸变(光束大小、位置以及光束内部的强度分布就出现起伏),这些畸变随着接收孔径的增大而更加突出。但是,如果接收孔径小于相干长度(r_0)的一定数值,时间平均信噪比不会受很大的影响^[2];相反,若接收孔径大于相干长度,畸变波前的信号束将难以与本机振荡辐射在相位上匹配,严重地影响了接收机的性能。因此,相干长度 r_0 可用作空间相干性退化程度的量度,它是在平行于平均波前的接收孔径上呈现相位相干的一个有限范围。Fried^[2] 以相位结构函数

$$D_\phi(r_0) \approx 6.88 [\text{rad}]^2$$

为判据,求得水平传输光程上 r_0 的表达式:

$$r_0 = 1.2 \times 10^{-8} \lambda^{6/5} L^{-3/5} C_n^{6/5} \quad (1)$$

式中 λ 为光波的波长,以 μm 计; L 为传输距离,以 m 计; C_n^2 为折射率结构常数,以 $\text{m}^{-2/3}$ 计。

对于外差探测而言,通常可用外差效率 η 来描述因湍流大气造成外差信号功率的降低。外差接收机的外差效率定义为

$$\eta = \bar{P} / P_{\max} \quad (2)$$

式中 \bar{P} 为有效外差信号功率, P_{\max} 为无湍流时的总接收功率。Goldstein^[6] 引用文献[3]的结果求得大接收孔径半径为 R 的外差效率的极限形式:

$$\eta_{\text{lim}} = 2.481 (\varepsilon R)^{-2} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon^{5/3} = 2.91 K^2 L C_n^2$ 。显然,随着湍流强度的增强,外差效率下降。

二、实 验

实验中应用本机振荡器频率 (ω_L) 和发送信号频率 (ω_s) 之间无频偏的外差探测技术,这种零拍外差探测技术略微不同于常用

的 $\omega_s \neq \omega_L$ 的标准外差技术,对于研究大气影响来说是很适宜的,可以避免单模、单频激光器件的不稳定性及两管外差中使用锁相技术的复杂性。信号光束以 1600 Hz 频率斩波后发送,由设置在 1350 m 处的平面反射镜折回,在混频器处与本振信号混频,拍频信号通过选频放大器放大,经检波后输入数字电压表显示(因为大气影响使发送信号受到相位起伏,所以相位同步检测是不方便的),并由数字打印机记录。在这种情况下,外差接收机的噪声等效功率^[7]

$$NEP = (\pi / \sqrt{2}) (hf / \eta_0) (B_{IF} / \tau)^{1/2} \quad (4)$$

式中 B_{IF} 为调谐放大器的带宽, τ 是电压表的滤波时间常数, η_0 是探测器的量子效率。

实验装置简图示于图 1。发射部分不加发射天线,使用氦-氖激光器导光。接收天线是一台 $\phi 220 \text{ mm}$ 的 30 倍望远镜系统,主镜焦距 2 m,接收机中所用的光学零件均满足 $\lambda/20$ 的要求。

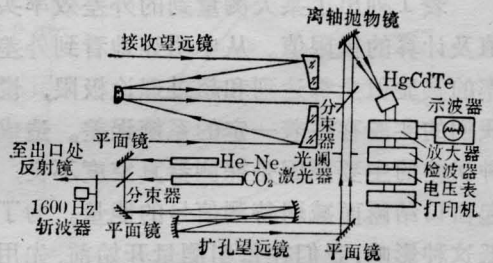


图 1 外差接收机简图

本振光路是根据与信号波阵面完全重叠的原则安排的,系统中采用扩孔望远镜使本振光波阵面与接收到的信号波阵面一致。

本振光束和信号光束在硫化锌楔形分束板处重合,经离轴抛物镜($f=275 \text{ mm}$)会聚到作为混频器的 77 K 的碲镉汞元件上,它的灵敏面积为 0.1 mm^2 。输出的混频信号由 1600 Hz 选频放大器放大,用示波器监视。

为了能适当调节本振光束的功率,在本振光路上放置可变光阑。测量本振功率时,将斩波器移到本振光路上。

最大外差信号功率 P_{\max} 是通过直接测

量 1600 Hz 的信号功率 P_s 和本振信号功率 P_0 , 由关系式 $P_{\max} = 2\sqrt{P_s P_0}$ 来求得的。因此外差效率为

$$\eta = \bar{P} / 2\sqrt{P_s P_0}$$

其中 \bar{P} 为外差信号的平均功率。短横线表示取 10s 时间的平均值。

实验过程中, 通过测量直接信号功率及其起伏方差的办法, 计算了当时情况下的对数强度起伏方差, 用以求出当时的折射率结构常数 C_n^2 值^[6]。

三、结果与分析

我们已对 9 月 10~12 日三天的数据作了统计处理, 按照公式(5)计算了外差效率; 又根据信号起伏方差与对数强度起伏方差的关系^[6], 通过孔径平滑因子加以修正, 求得折射率结构常数, 利用(3)式计算了外差效率的理论极限值。

表 1 列出了某天测量到的外差效率实验值及计算的极限值。从中明显地看到外差效率的实验值全都达到和超过理论极限, 说明我们的实验存在着一定的系统误差。造成这种误差的主要原因是探测器真空度不良, 引起窗口结露而减弱待测信号的能量。为了减低这种影响, 我们在每组测量开始前, 先用棉球擦拭接收器窗, 然后依次在尽可能短的时间间隔内完成信号光束和本征光束的测量。然而, 由于能量的衰减随结露的状况不同而

表 1 实验结果(9 月 12 日)

时间	外差效率实验值	相干长度 r_0 (m)	归一化孔径 $\frac{D}{r_0}$	理论外差极限效率	相对误差
9:50	0.13	0.073	3.02	0.10	30%
10:20	0.15	0.085	2.59	0.14	7%
11:00	0.12	0.068	3.24	0.09	33%
11:45	0.12	0.068	3.24	0.09	33%
12:10	0.11	0.072	3.06	0.10	10%
12:45	0.17	0.091	2.42	0.17	0%
13:45	0.18	0.096	2.29	0.18	0%
14:50	0.25	0.098	2.25	0.18	38%

异, 因此在测量过程中稍不注意或两次测量的时间间隔不同, 都会造成难以消除的偶然误差。误差分析指出: 实验中出现的最大相对误差可达 38%。

根据测量和计算的数据, 我们作了外差效率和归一化直径(实际接收孔径 D 与相干长度 r_0 之比)的关系曲线(图 2)。由图可见, 当接收孔径小于相干长度时, 因大气湍流造成的空间相干性退化不明显, 外差效率随归一化接收孔径的增大而增加; 而在相反情况下, 外差效率下降。这是因为相干光源的相干性受到破坏, 无法与未受畸变的本机振荡辐射的波阵面相匹配的缘故。上述结果对指导合理选用接收孔径是十分重要的。

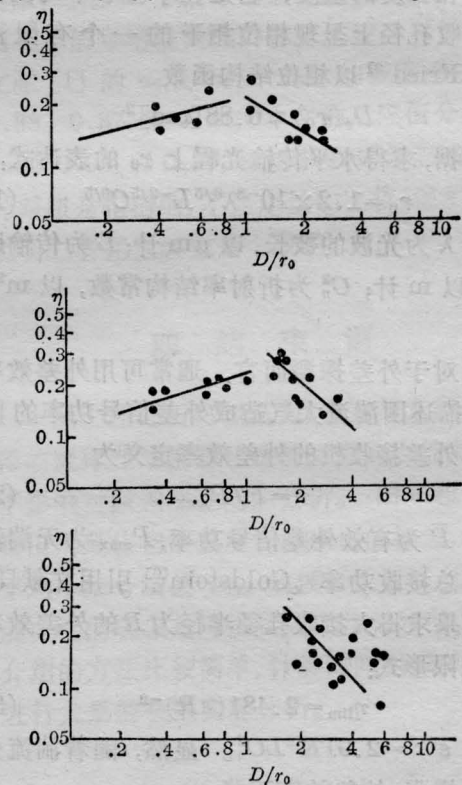


图 2 外差效率与归一化孔径的关系
(上) 9 月 10 日 (中) 9 月 11 日 (下) 9 月 12 日

Gardner 和 Hadara^[8] 分别用平方律和 5/3 定律的相位结构函数形式对圆孔径和矩形孔径的外差信号功率损失作了理论推导, 结果表明: 在 $D/r_0 > 1$ 的情况下, 随着接收

孔径增大, 大气湍流对相干光源的空间相干性破坏越突出, 外差信号功率损失越大, 外差效率就越低。我们的实验结果与他们的理论预计完全吻合。

四、结 语

为了提高测量信号电平, 也为了克服湍流扰动造成的信号电平起伏, 最简单的方法是增大接收系统的孔径, 但在外差测量系统中, 正如我们的实验结果所表明的, 当接收系统孔径大于相干直径 r_0 时, 再增大接收孔径就会使外差效率降低。因此, 在实际选择接收孔径时必须两者兼顾。我们认为, 取 $D=r_0$ 作为折衷值是适宜的, 这样才能使信号功率具有最小的起伏。

从实用观点出发, $D>r_0$ 时, 大气湍流使外差效率下降, 尤其在 $D\gg r_0$ 时, 大气调制噪声突出^[9]。可以说在直径 r_0 的圆外边部分的接收面积实际上是有损的。为了适应因大气光学条件或因传输路径等的改变而造成的变化, 在设计光外差接收机时应对接收系统的直径作光阑控制, 这样才能确保外差接

收机在 $D\approx r_0$ 的状态下良好工作。

在低层大气中, 尤其在近地面层工作, 由于湍流强烈, 使得 r_0 减小, 而到达角起伏增大^[10], 不能有效利用大面积接收系统。但只要合理地抬高接收机的工作位置, 适当选择工作时间, 较大接收口径的外差接收机的利用是不会有问题的。

参加本工作的还有宋正方、顾慰渝、戚福弟等同志。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院安徽激光机所二室;《激光》, 1979, No. 2, 52.
- [2] D. L. Fried; *Proc. IEEE*, 1967, **55**, No. 1, 57.
- [3] H. Hadara; *Proc. IEEE*, 1968, **56**, No. 12, 2130.
- [4] R. F. Lucy *et al.*; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, 1333.
- [5] R. F. Lucy, K. Lang; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, 1965.
- [6] I. Goldstein *et al.*; *Proc. IEEE*, 1965, **53**, No. 9, 1172.
- [7] E. D. Hinkley; "Laser Monitoring in the Atmosphere", Springer, 1977.
- [8] B. N. 塔塔斯著; "湍流大气中波的传播理论", 科学出版社, 1978.
- [9] D. L. Fried; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1967 **QE-3**, No. 6, 213.
- [10] J. R. Kerr *et al.*; *Proc. IEEE*, 1970, **58**, No. 10, 1691.

简讯

山东、河南、黑龙江、江苏激光(光学)学会联合年会在烟台召开

山东、河南、黑龙江、江苏激光(光学)学会联合年会 1985 年 10 月 21~25 日在山东省烟台市召开, 来自四省的 120 多名代表及外省市的部分代表参加了这届联合会。

会议除听取了大会特邀报告外, 还设三个分会场, 对 130 多篇论文进行了交流, 交流的内容包括激

光基础理论的研究、激光新材料的探索、激光新器件的研制、激光应用新领域的开拓、激光医学理论和临床应用的发展、激光生物工程的探讨和展望等。

下届联合会预计在河南省召开。

(吉 禾)