

# 外差锁定式相干光通信

廖世强 卞淑姮 孙顺娣

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 提出并研制了一种新的外差锁定激光频率调制系统, 可用于相干光通信, 并进行了闭环调频、调幅实验。对实用的外差锁定式半导体激光器光纤通信系统的技术条件作了讨论。

## Laser heterodyne bias frequency-locking for coherent optical communication

Liao Shiqiang, Bian Shuheng, Sun Shundi

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

**Abstract:** A new frequency modulation system for lasers by heterodyne bias frequency-locking is proposed and developed. The technique can be used in heterodyne or coherent single mode optical communication. Experiments on grating-tuned CO<sub>2</sub> laser system and Zeeman He-Ne laser system are described. Radio broadcast has been relayed in the locked system successfully. The conditions for practical optical fiber communication with semiconductor laser of heterodyne bias frequency-locked system are discussed.

### 一、概 述

目前, 不能在光纤通信中有效使用外差接收, 是由于存在两个尚待解决的难题。一是要求发射的激光器和本振激光器都必须具有极高的频率稳定度; 二是光纤传输中外环境的变化会引起载波激光的偏振发生变化, 而外差混频效率又决定于载波激光与本振激光之间的偏振匹配。

本文提出一种新的相干光通信原理, 能十分方便地进行外差检测接收, 同时有效地解决上述两个问题。在光栅选支 CO<sub>2</sub> 激光器系统和塞曼 He-Ne 激光系统上作了验证,

成功地转播了无线电广播。

### 二、原 理

有两台振荡在同一谱线上的单纵模激光器, 一台为已稳频的本振激光器, 另一台为在线宽  $\Delta\omega$  内可调谐的信号载波激光器。将后者偏频锁定于稳频激光器上<sup>[1]</sup>。两台激光的差拍频率  $|\omega_1 - \omega_2| < \Delta\omega$ , 落在无线电频段内。然后在伺服环内再引入第二次外差本振源  $\omega_L$ , 见图 1。 $\omega_L$  亦在无线电频段内。则在鉴频器前的两次混频后的信号可表示为:

$$A = A_L \cos[(|\omega_1 - \omega_2| - \omega_L)t + \varphi] \quad (1)$$

收稿日期: 1985年6月26日。

在伺服环路闭环控制时,必须满足条件:

$$|\omega_1 - \omega_2| - \left( \omega_L - \frac{d\varphi}{dt} \right) = \omega_D \quad (2)$$

其中  $\omega_D$  为鉴频器中心频率。由于稳频激光器频率  $\omega_1$  和  $\omega_D$  都已为确定值,因此,受控激光频率  $\omega_2$  完全由第二次外差的本振频率  $\omega_L$  及其起伏  $d\varphi/dt$  所牵引。当  $\omega_L$  被一音频信号  $\Omega$  所调制时,对于调幅方式有

$$A_L = |A_L| (1 + m \sin \Omega t) \quad (3)$$

对于调频方式有

$$\varphi = \varphi_0 \sin \Omega t. \quad (4)$$

因此,能十分方便地实现对可调谐激光器进行调频或调幅。

当用于外差光通信时,锁定的孪生激光器一个作为本振光,一个作为信号光同时发射和传输。在接收端直接用光混频器获得差拍频率  $|\omega_1 - \omega_2|$ 。再用无线电接收机直接还原出音频调制信号。这种相干光通信的特点是取消了接收端的本振激光。此外,发射端的双激光器是相对锁定的,这就降低了两地激光一致稳频的苛刻要求。由于锁定时已满足了偏振匹配的要求,同步传输使外环境对两束激光的偏振受相同数量的影响,因此在接收端偏振匹配也不受到破坏。

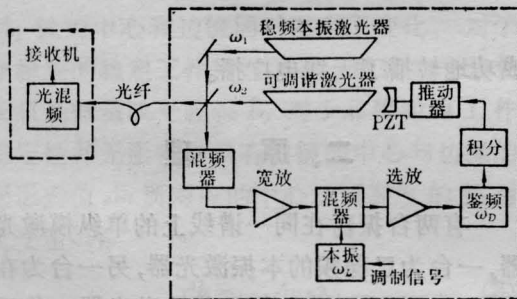


图1 外差锁定式光纤通信原理图

实用时还必须考虑到,光外差信号应始终落在接收机的频率选择性带宽以内,否则接收机的频率调谐不能跟踪光外差的中心频率,接收机只能时断时续收到信号,甚至收到信号后再失调。这就对外差锁定系统在无调频时的锁定精度有严格要求,从无调制时系

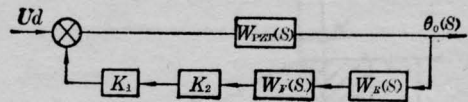


图2 外差锁定系统静差扰动动态方框图

统闭环线路给出锁定后的静差扰动动态方框图(见图2),可求出锁定精度的表示式。写出扰动  $U_d$  的传递函数

$$W_d(S) = \frac{W_{PZT}(S)}{1 + W_{PZT}(S)G(S)} \quad (5)$$

$$G(S) = K_1 \cdot K_2 \cdot W_F(S) \cdot W_R(S) \quad (6)$$

其中,前级光混频及宽放的传递函数写为放大系数  $K_1$ ;二次混频及选放的传递函数写为放大系数  $K_2$ ;鉴频器等效为一电阻  $R$  串接  $LC$  的并联回路,放大因子为  $K_F$ ,它的传递函数为:

$$W_F(S) = \frac{K_F T_F S}{1 + LCS^2 + T_F S}$$

$$T_F = L/R$$

积分器的运算放大因子为  $K_R$ ,积分常数为  $T_R$ ,它的传递函数为

$$W_R(S) = K_P \left[ \frac{1 + T_R S}{T_R S} \right].$$

压电陶瓷 PZT 等效写为电阻和电容  $C_P$  的串接,时间常数为  $T_P = R_P C_P$  传递函数为

$$W_{PZT}(S) = \frac{K_P}{1 + T_P S}$$

由式(5)可写出  $W_d(S)$  的表示式。再由终值原理得出锁定精度量为

$$e_{dy} = \lim_{s \rightarrow 0} W_d(S) = \frac{K_P}{1 + K_1 K_2 K_F K_R K_P \cdot T_F / T_R} \quad (7)$$

与一般的稳频环路不同之处在于,环路必须对调频信号有快速响应。即在环路无振荡时,式(7)中的积分常数  $T_R$  总是取得尽可能小。因此有

$$e_{dy} \approx \frac{T_R}{K_1 K_2 K_F K_R T_F} \quad (8)$$

外差锁定精度,实质上是通过选择环路中各项部件的增益达到的。

一般接收机的选择性带宽为  $\pm 10 \text{ KHz}$ ,

如在光通信中选用红光激光源时, 对应的锁定精度要求应优于  $5 \times 10^{-9}$ , 这在实验中不难做到。

### 三、实 验

用光栅选支  $10.6 \mu\text{m CO}_2$  激光系统及  $632.8 \text{nm}$  塞曼 He-Ne 激光系统, 分别进行了外差锁定后的调频及调幅实验。用  $\text{CO}_2$  激光时, 前级光混频级在  $77 \text{K}$  的 HgCdTe 上进行。用 He-Ne 激光时是在雪崩光电二极管上进行。环路其他部件均相同:  $K_1=48 \text{ dB}$ ,  $K_2=12 \text{ dB}$ ,  $K_F=118 \text{ dB}$ ,  $K_R=14 \text{ dB}$ ,  $T_R=3.6 \text{ ms}$ 。

控制环路对双激光差拍频率的响应从  $300 \text{ kHz}$  到  $50 \text{ MHz}$ , 以便能实际转播无线电广播。

图 3 为无外调制时锁定精度的实测结果, 测量时  $\text{CO}_2$  激光系统的差拍为  $9 \text{ MHz}$ 。He-Ne 激光系统的差拍为  $1.2 \text{ MHz}$ 。两种激光系统的锁定精度给出的差拍绝对频率起伏量, 都小于商用接收机的选择性带宽达一个量级以上。

图 4 为将闭锁后的塞曼 He-Ne 激光经

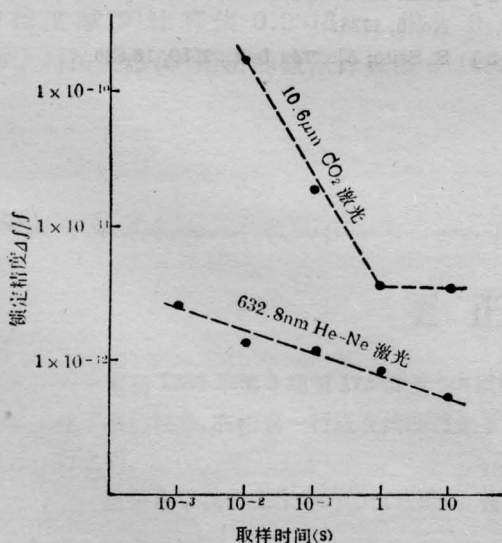
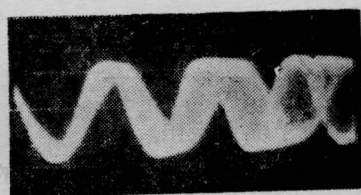
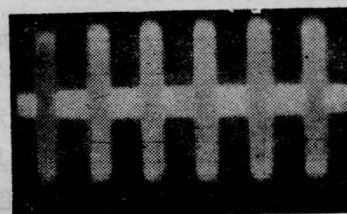


图 3 无外调制时外差锁定精度的实测曲线

过光纤传播, 在接收端用雪崩光电二极管光混频后, 得到的锁定频率调制波形照片。在 APD 窗口上当总功率小于  $4 \times 10^{-2} \text{ mW}$  的两束激光差拍时, 可获得优于  $1 \text{ mV}$  的信号输出, 比一般接收机的灵敏度(约  $200 \mu\text{V}$ )高出近一个量级。图 4(a) 为  $300 \text{ Hz}$  外调制对被锁激光器调频的结果。二次外差本振源为 V.C. O, 当它的振荡回路中的变容二极管受到峰值为  $2 \text{ V}$  的正弦调制时, 能产生  $0.4 \text{ MHz}$  的调频频偏, 随后被转移到被锁激光频率上。图 4(b) 为  $400 \text{ Hz}$  正弦波调制第二次外差本振源的输出幅度后的结果。在鉴频器前用了一个高增益的限幅放大器, 结果形成的脉冲调幅输出被转移到被锁激光器载波的幅度上。两者都有稳定的波形。



(a)



(b)

图 4 塞曼 He-Ne 激光系统锁定发射后接收到的差拍波形照片  
(a) 调频锁定发射后接收的差拍波形;  
(b) 调幅锁定发射后接收的差拍波形

实验中将无线电调幅广播的音频信号, 作用在第二次本振源 V. C. O 上, 成功地将无线电广播转换成了激光的调频发射。经过光纤传输, 在接收端上用 APD 探测, 获得带调频信号的光混频输出。再用一符合门检波器取出音频调制信号, 直接输入到收音机的扩音级, 清晰而稳定地转播了电台广播。证实了这种相干光纤通信的可行性和可靠性。



#### 四、讨 论

外差接收能提高探测灵敏度的一个重要因素在于,接收处的本振源是高输出功率,外差接收的信噪比与本振激光功率的关系为<sup>[2]</sup>,

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta e/h\nu)^2 P_{Lo} P_s}{2e(\eta e/h\nu) P_{Lo} B + 4KTFB/R_L} \quad (9)$$

式中 $\eta$ 为探测器的量子效率, $F$ 为前级放大器的噪声系数, $R_L$ 为APD的负载, $B$ 为接收机带宽, $K$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为接收机温度, $P_s$ 为信号光功率, $P_{Lo}$ 为本振激光功率。理想情形是 $P_{Lo} \gg P_s$ ,这时认为 $P_{Lo} \rightarrow \infty$ ,则有

$$\frac{S}{N} \approx \frac{P_s}{2h\nu B} \quad (10)$$

系统达到量子噪声极限。

目前,光通信外差接收和成熟的商用无线电外差接收之间最大的差别在于,可供实用的单纵模半导体激光器或He-Ne激光器输出功率均只有毫瓦级,而无线电接收的本振源的输出功率可以达瓦级。从这个意义上讲,光通信外差接收不论将本振激光器放置在发射端或接收端都不能满足式(10)的条件,但外差接收有效地抑制了背景光照,避开了热噪声,只剩余散粒噪声。我们在严格相同

的条件下,直接测试比较了这两种检测的信号-噪声比,用一台塞曼He-Ne激光作发射,输出功率为0.1mW。APD接连一带宽1Hz~200kHz的宽放作接收器,当用非相干直接光检测时,得到的信噪比为20dB。当用相干差拍检测时,纵向磁场取约为10Gs,同时光路中放置 $\lambda/4$ 片,得到的信噪比为44dB。显然,即使在式(10)的条件不满足情形下,外差检测的信噪比仍然高于直接检测一个量级以上。本文实验中使用He-Ne系统,而用稳频的半导体激光外差锁定可调谐的单纵模半导体激光器,锁定精度不会低于He-Ne系统。Saito进行了用光纤同时传输两束自由状态半导体激光在终端混频的实验<sup>[3]</sup>,如采用本文实验中的锁定闭环系统的数据计算,对于输出为1mW的 $1.5\mu\text{m}$ 双半导体激光外差锁定系统进行光纤通信时,传输中继站距离可延伸200km,仍能清晰地转播无线电广播,这种前景具有的实际意义是明显的,是十分诱人的。

#### 参 考 文 献

- [1] D. C. Wilson, W. R. C. Rowley; *J. Sci. Inst.*, 1966, **43**, 314.
- [2] Takanori Okoshi; *IEEE T. MTT*, 1982, **MTT-30**, No. 6, 1138.
- [3] S. Saito; *Electron Lett.*, 1980, **16**, 826.