

# 激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响\*

孔英秀<sup>1,2</sup>, 柯熙政<sup>1</sup>, 杨媛<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 西安工业大学光电工程学院 西安 710021)

**摘要:**空间相干光通信系统的信噪比受激光器线宽的影响很大。对比分析了两光束到达平衡探测器光敏面的时间差  $\tau_d$  和探测器特性参数不同时,激光器线宽对外差探测输出信噪比的影响。理论分析和实验结果表明,激光器线宽展宽引起差频信号带宽增大与  $\tau_d$  无关。当差频信号带宽增大 2.673 倍时,输出信噪比减小 0.369 2 倍,约等于 1/2.673。增大探测器的内增益、响应度和响应带宽,可以减缓信噪比随激光器线宽增大而减小的速度,但内增益和响应带宽过大,相应的噪声信号也越强,反而不利于信噪比的提高。

**关键词:**空间相干光通信;激光器线宽;外差探测;信噪比;相干时间

**中图分类号:** TH741 TN929.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Influence of laser linewidth on the performance of space coherent optical communication system

Kong Yingxiu<sup>1,2</sup>, Ke Xizheng<sup>1</sup>, Yang Yuan<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Photoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The signal-to-noise ratio (SNR) of space coherent optical communication system is greatly influenced by the laser linewidth. This paper compares and analyzes the influence of laser linewidth on the SNR of the heterodyne detection output when the time difference  $\tau_d$  that two beams arrive at the photosensitive surface of the balanced detector and the detector characteristic parameter are different. Theoretical analysis and experiment result show that the differential frequency signal bandwidth increasing caused by laser linewidth broadening is independent with  $\tau_d$ . When the differential frequency signal bandwidth increases by 2.673 times, the output SNR decreases by 0.369 2 times, which is approximately equal to 1/2.673. Increasing the internal gain, response degree and response bandwidth of the detector can slow down the SNR decreasing speed as the laser linewidth increases; however, when the internal gain and response bandwidth are too large, corresponding noise signal is also stronger, which is not benefit to the improvement of the SNR.

**Keywords:** space coherent optical communication; laser linewidth; heterodyne detection; signal-to-noise ratio (SNR); coherent time

## 1 引言

空间相干光通信系统在接收端采用外差探测方式,是将接收信号的频率从  $10^{14}$  Hz 的光频域转换到  $10^8 \sim 10^9$  Hz 的电频域,探测两光束的差频信号<sup>[1-5]</sup>。差频信号的频率要比光源频率低  $10^5 \sim 10^6$  个数量级,这就要求激光器输出的光信号不但要有稳定的中心频率,且谱线宽

度要求很窄<sup>[6-7]</sup>。在光频域范围内,激光器中心波长和谱线宽度的微小漂移,会引起差频信号带宽的急剧增加,数量级会达到几十 GHz 以上<sup>[8]</sup>。为了探测有效的差频信号,势必要增大探测器的响应带宽,这就无法体现外差探测滤波性能好的优点<sup>[9-12]</sup>。基于此,文献[8]介绍了零差探测中光放大器的个数对激光器线宽的影响,得出在比特率、误码率和功率分光比一定的情况下,光放大器的个数越少对激光器的线宽要求越严格;文献[13]介绍了光

收稿日期:2017-02 Received Date: 2017-02

\* 基金项目:国家自然科学基金(61377080)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)项目资助

纤相干光通信系统中不同调制形式对激光器线宽的要求,并得出在相同的线路符号速率、误码率(bit-error rate, BER)和信噪比(signal to noise ratio, SNR)代价条件下,高阶调制格式对激光器线宽的要求更严格;文献[14-15]研究了激光光源线宽对外差探测性能的影响,得出激光光源的谱线展宽引起外差探测差频信号的谱线也随之展宽,输出信号的信噪比大大减小;文献[8]研究的是零差探测;但文献[13]研究的是光纤相干通信,属于有线传输,且受光纤色散的影响很大,文献[14-15]的研究中本振光为回波光场,而非两个激光器出射光场的外差探测。且文献[8,13-15]都没有研究两光束到达探测器光敏面的时间差和探测器探测参数不同时,激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响。因此,本文通过理论和实验进一步研究了两光束到达探测器光敏面的时间差和探测器探测参数不同时,激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响

## 2 随机相位差与激光器线宽

空间相干光通信原理如图1所示,外差探测中所用的光源为准单色光源,其线宽很窄。

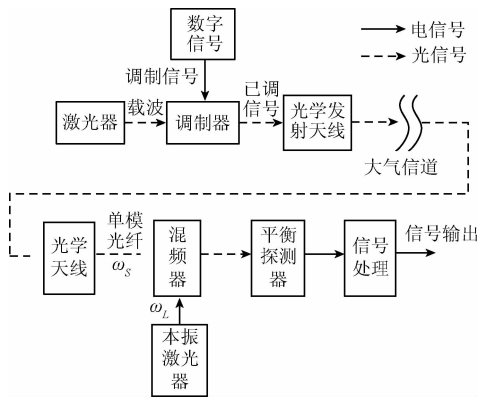


图1 空间相干光通信外差探测原理

Fig.1 The heterodyne detection principle of space coherent optical communication

假设两束光具有相同的偏振态,则信号光场和本振光场的复数形式为:

$$E_L(t) = A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_L(t)]\} \quad (1)$$

$$E_S(t) = A_S \exp\{i[\omega_S(t - \tau_d) + \varphi_S(t - \tau_d)]\} \quad (2)$$

式中: $A_L$ 和 $A_S$ 、 $\omega_L$ 和 $\omega_S$ 、 $\varphi_L(t)$ 和 $\varphi_S(t)$ 分别为本振光和信号光的振幅、角频率和初相位,且 $P_L = A_L^2/2$ 、 $P_S = A_S^2/2$ , $\tau_d$ 为两光束到达探测器光敏面上的时间差。两束光在探测器光敏面上进行相干混频,由探测器的平方律特性可得探测器输出的光电流为:

$$i(t) = \beta A_L^2 + \beta A_S^2 + \beta A_L A_S \exp\{i[\Delta\omega_{IF}t - \omega_S\tau_d +$$

$$\varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t)]\} + \beta A_L A_S \exp\{-i[\Delta\omega_{IF}t - \omega_S\tau_d + \varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t)]\} \quad (3)$$

式中:令 $A_S/A_L = \alpha$ , $\omega_{IF}$ 为差频信号的角频率, $\beta$ 为探测器的响应度,则探测器输出的光电流可表示为:

$$i(t) = \beta A_L^2 + \alpha^2 \beta A_L^2 + \beta A_L A_S \exp\{i[\Delta\omega_{IF}t - \omega_S\tau_d + \varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t)]\} + \alpha \beta A_L^2 \exp\{-i[\Delta\omega_{IF}t - \omega_S\tau_d + \varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t)]\} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,探测器输出的差频信号电流是信号光和本振光功率、差频信号频率、探测器响应度、两光束到达探测器光敏面上时间差和两光束相位差的函数。

## 3 信噪比与激光器线宽

式(4)为探测器输出的差频信号光电流的表达式,但式中并不含有激光器的线宽,为了讨论激光器的线宽对外差探测系统性能的影响,现在将式(4)进行处理。为了后续分析方便,令 $\beta = 1, 1 + \alpha^2 = A$ ,记 $e(t) = i(t)/A_L^2$ ,代入式(4)可得:

$$e(t) = i(t)/A_L^2 = A + \alpha \exp\{i[\Delta\omega_{IF}t - \omega_S\tau_d + \varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t)]\} + \alpha \exp\{-i[\Delta\omega_{IF}t - \omega_S\tau_d + \varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t)]\} \quad (5)$$

由式(3)~(5)可知,探测器输出的光电流包含直流信号和差频信号两部分,而差频信号中存在随机变化的相位部分,这种随机变化的相位会造成差频信号频谱的展宽,若频谱展宽量超过了平衡探测器的响应带宽,那么探测器就不能输出差频信号光电流。根据维纳-辛钦定理可知,平稳随机信号的自相关函数和其功率谱密度构成傅里叶变换对<sup>[16]</sup>。因此,可通过光电流的自相关函数求得功率谱。差频信号光电流的自相关函数为:

$$G(\tau) = \langle e(t) \cdot e^*(t + \tau) \rangle \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),并化简得:

$$G(\tau) = A^2 + \alpha^2 \exp(-i\Delta\omega_{IF}\tau) [\exp\{i[\varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t) - \varphi_S(t + \tau - \tau_d) + \varphi_L(t + \tau)]\}] + \alpha^2 \exp(i\Delta\omega_{IF}\tau) [\exp\{-i[\varphi_S(t - \tau_d) - \varphi_L(t) - \varphi_S(t + \tau - \tau_d) + \varphi_L(t + \tau)]\}] \quad (7)$$

$$\Delta\phi(t, \tau) = \varphi_S(t + \tau) - \varphi_L(t) \quad (8)$$

信号及噪声理论认为,激光器输出光场的相位波动是一个平稳随机过程,且服从零均值高斯分布<sup>[17]</sup>,通过理论分析可得关系式<sup>[18]</sup>为:

$$\langle \exp[\pm i\Delta\phi(t, \tau)] \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2}\langle \Delta\phi^2(t, \tau) \rangle\right] \quad (9)$$

式中: $\langle \Delta\phi^2(t, \tau) \rangle = \Delta\omega|\tau|$ , $\Delta\omega$ 是激光器的谱线宽度, $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ 对应的相干时间为 $\tau_c = 2\pi/\Delta\omega$ 。外差探测得随机信号的自相关函数具有偶函数特性,所得结果要满足以上特性,下面根据 $\tau$ 和 $\tau_d$ 的关系进行讨论。

当  $\tau \geq \tau_d$  时,记:

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi(t + \tau) - \phi(t + \tau - \tau_d) \\ \phi_2 = \phi(t) - \phi(t - \tau_d) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\phi_1$  和  $\phi_2$  为相互独立的量,依据式(9)和(10),对式(7)进行化简整理,得:

$$G(\tau) = A^2 + 2\alpha^2 \cos(\Delta\omega_{IF}\tau) \exp(-\Delta\omega|\tau_d|) \quad (11)$$

当  $\tau \leq \tau_d$  时,记:

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi(t + \tau) - \phi(t) \\ \phi_2 = \phi(t + \tau - \tau_d) - \phi(t - \tau_d) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\phi_1$  和  $\phi_2$  亦为相互独立的量,依据式(9)和(12),对式(7)进行化简整理,得:

$$G(\tau) = A^2 + 2\alpha^2 \cos(\Delta\omega_{IF}\tau) \exp(-\Delta\omega|\tau|) \quad (13)$$

综合式(11)、(13)的结果有:

$$G(\tau) =$$

$$\begin{cases} A^2 + 2\alpha^2 \cos(\Delta\omega_{IF}\tau) \exp(-\Delta\omega|\tau_d|), t \geq \tau_d \\ A^2 + 2\alpha^2 \cos(\Delta\omega_{IF}\tau) \exp(-\Delta\omega|\tau|), t < \tau_d \end{cases} \quad (14)$$

通过分析可以看出,式(14)中的自相关函数为偶函数,根据维纳-辛钦定理有:

$$G(\omega) = 2 \int_0^{\infty} G(t) \cos(\omega t) dt \quad (15)$$

计算自相关函数  $G(\tau)$  的功率谱  $G(\omega)$ ,且取  $\tau_d > 0$ 。

将式(14)代入式(15)得:

$$\begin{aligned} G(\omega) &= A^2 \delta(\omega) + 2\alpha^2 \exp(-\omega\tau_d) \delta(\Delta\omega_{IF} - \omega) + \\ &\frac{2\alpha^2 \Delta\omega}{(\Delta\omega_{IF} - \omega)^2 + \Delta\omega^2} \cdot \exp(-\Delta\omega\tau_d) \cdot \\ &\left[ \exp(\Delta\omega\tau_d) + \frac{\sin(\Delta\omega_{IF} - \omega)\tau_d}{\Delta\omega_{IF} - \omega} - \cos(\Delta\omega_{IF} - \omega)\tau_d \right] \end{aligned} \quad (16)$$

当两光束到达探测器光敏面的时间延迟  $\tau_d$  远远大于两光束的相干时间  $\tau_c$  时,式(16)可以近似表示为:

$$G(\omega) \approx \frac{2\alpha^2 \Delta\omega}{(\Delta\omega_{IF} - \omega)^2 + \Delta\omega^2} \quad (17)$$

为了研究激光器线宽对外差探测系统性能的影响,现根据激光光源随机相位的统计特性来讨论外差探测的信噪比。考虑到平衡探测器自身的内增益  $G$ ,结合式(4)和(9)可以计算出探测器光敏面上外差探测的平均光电流为:

$$i_{IF}(t) = 2\alpha\beta G A_L^2 \cos(\Delta\omega_{IF}t - \omega_s\tau_d) \cdot$$

$$\exp\left(-\frac{1}{2}\Delta\omega|\tau_d|\right) \quad (18)$$

探测器输出的平均光功率为:

$$P_{IF} = 2\alpha^2\beta^2 G^2 A_L^4 \exp^2\left(-\frac{1}{2}\Delta\omega|\tau_d|\right) R \quad (19)$$

外差探测中差频频带范围内的散粒噪声和热噪声功率分别为:

$$\begin{cases} (N_p)_s = 2G^2 e[\beta(P_s + P_L + P_B) + I_D] \Delta f_{IF} R \\ (N_p)_j = 4kT \Delta f_{IF} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\Delta f_{IF} = \Delta\omega_{IF}/2\pi$  为差频信号带宽,  $P_B$  为背景辐射功率,  $I_D$  为混频器的暗电流,  $T$  为热力学温度,  $k$  为波尔茨曼常数,  $e$  为电子电荷,  $R$  为负载电阻,  $\beta$  为探测器的响应度。由式(19)和(20)可得外差探测的信噪比为:

$$SNR_{IF} = \frac{8\alpha^2\beta^2 G^2 P_L^2 \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta\omega|\tau_d|\right) R}{e\Delta f_{IF} \beta G^2 P_L^2 R + 2kT \Delta f_{IF}} \quad (21)$$

由式(19)和式(21)可知,探测器输出的平均光功率和外差探测的信噪比都受激光器线宽的影响。

## 4 数值分析

激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响可以通过式(21)分析讨论。结合实验中平衡探测器所需的最大入射光功率,以及自身的参数,数值分析时激光器的中心波长取 1 550 nm,  $P_L = 450 \mu\text{W}$ ,  $P_s = 23 \mu\text{W}$ ,  $\Delta f_{IF} = 200 \text{ MHz}$ ,  $\beta = 0.9$ ,  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $R = 50 \Omega$ ,对式(16)和(17)进行数值仿真。图2和3分别为  $\tau_d \leq \tau_c$  和  $\tau_d \gg \tau_c$  时,差频信号的功率谱随激光器线宽变化的关系曲线。可以看出,两种情况下当激光器的线宽增大时,差频信号的谱宽都在增大,且谱线宽度的增大不受  $\tau_d$  的影响。当  $\tau_d \leq \tau_c$  时,差频信号的功率谱曲线中有冲击函数的成分,且随着谱线宽度的增大,中心频率发生了微小的漂移,若差频信号的谱宽大于平衡探测器的响应带宽后,平衡探测器将不再输出差频信号光电流。

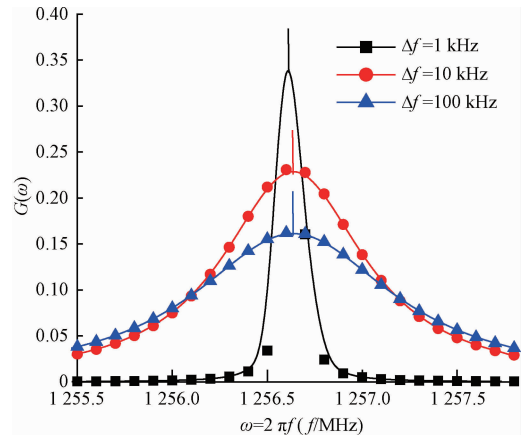


图2  $\tau_d \leq \tau_c$  时,  $G(\omega)$  随线宽的变化

Fig.2  $G(\omega)$  vs. linewidth when  $\tau_d \leq \tau_c$

图4所示为差频信号输出的信噪比随激光器线宽的变化关系,由图4可知差频信号输出的信噪比随激光器线宽的增加而减小,且两光束到达探测器光敏面的时间差、差频信号带宽以及探测器的特性参数不同时,信噪比减小的速度也不一样。

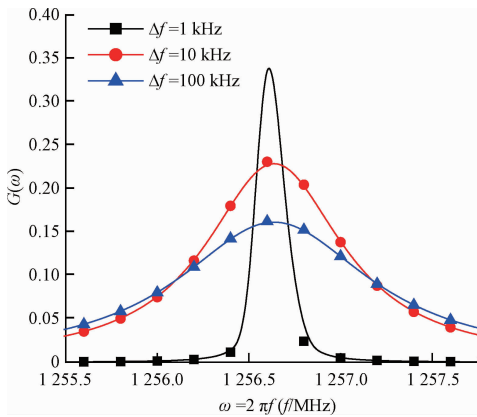
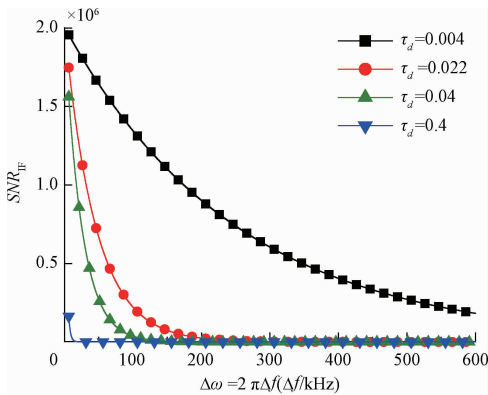


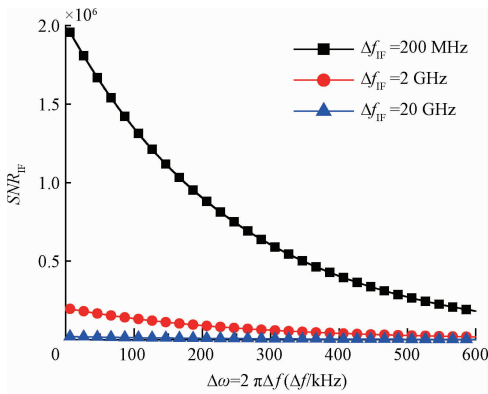
图 3  $\tau_d \gg \tau_c$  时,  $G(\omega)$  随线宽的变化

Fig. 3  $G(\omega)$  vs. linewidth when  $\tau_d \gg \tau_c$ .

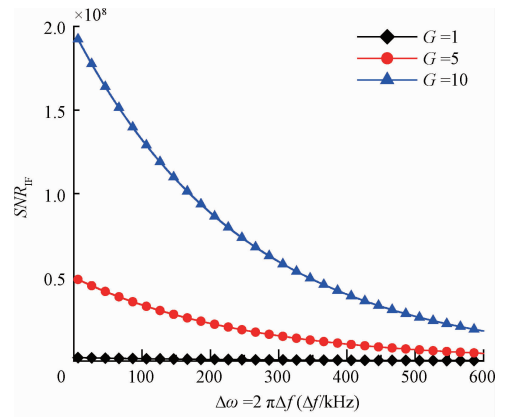
图 4 (a) 所示为  $\tau_d$  不同时探测器输出差频信号信噪比随激光器线宽的变化关系,可知,当  $\tau_d$  一定时,随着激光器线宽的增大,差频信号输出的信噪比减小,且  $\tau_d$  越大,信噪比减小越快。分析其原因,是因为外差探测的本振光通过单模光纤直接接入平衡探测器,而信号光经过湍流大气传输到平衡探测器光敏面上时,不但光场的能量大大减小,且光场的波前和偏振态都发生了变化,从而降低了两束光在平衡探测器光敏面上的混频效率,进而降低了差频信号的信噪比。



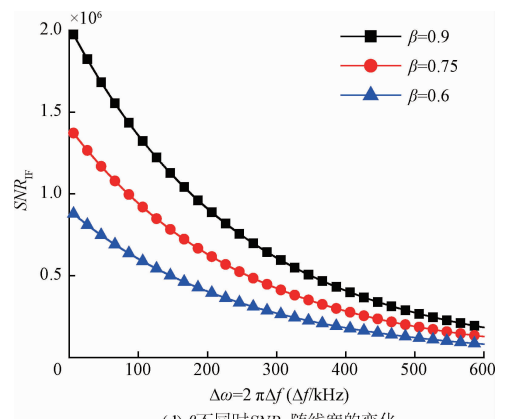
(a)  $\tau_d$  不同时  $SNR_{IF}$  随线宽的变化  
(a) The  $SNR_{IF}$  vs. linewidth for different  $\tau_d$



(b)  $\Delta f_{IF}$  不同时  $SNR_{IF}$  随线宽的变化  
(b) The  $SNR_{IF}$  vs. linewidth for different  $\Delta f_{IF}$



(c)  $G$  不同时  $SNR_{IF}$  随线宽的变化  
(c) The  $SNR_{IF}$  vs. linewidth for different  $G$



(d)  $\beta$  不同时  $SNR_{IF}$  随线宽的变化  
(d) The  $SNR_{IF}$  vs. linewidth for different  $\beta$

图 4 差频信号的信噪比随激光器线宽的变化关系

Fig. 4 The  $SNR_{IF}$  of differential frequency signal vs. laser linewidth

图 4 (b) 所示为差频信号带宽不同时信噪比随激光器线宽的变化关系。当差频信号带宽一定时,差频信号输出的信噪比随激光器线宽的增大而减小,且差频信号带宽越大,信噪比下降越迅速。这是因为,当激光器的线宽随机展宽时,引起两光束混频时差频信号带宽增大。通常通信波段的光频率在 100 THz 以上,激光器线宽的微小展宽,可能会导致差频信号的带宽增加到几十 GHz 的量级,甚至超出了平衡探测器的响应带宽。假定探测器有足够的带宽能响应出差频信号光电流,但在很宽的差频信号带宽内包含了多余的暗电流、背景光和热噪声等噪声源,从而使输出差频信号的信噪比大大减小。

图 4 (c) 和 (d) 为平衡探测器的内增益和响应度不同时差频信号输出的信噪比随激光器线宽的变化关系。由两图可知,选择内增益越大、响应度越高的探测器,会大大提高差频信号输出的信噪比,但不是内增益越大越好,内增益过大反而会增大平衡探测器自身的噪声,严重时噪声增大的幅值反而会大于信号,不利于信噪比的提高。

根据上分析可知,空间相干光通信系统中外差探测的结果虽然受激光器线宽影响,但不会因线宽增加而导致差频信号的不可检测,只要探测器的线宽足够宽,照样能探测到外差信号,只是信噪比大大降低。

### 5 实验

由数值分析可知,当激光器线宽增大时,空间相干光通信系统的差频信号带宽相应变宽,只要选择带宽足够宽的平衡探测器,照样能探测到差频信号,只是输出信噪比会大大降低。为了进一步验证数值分析结果的正确性,实验室在室内进行了空间相干光通信实验,实验原理如图5所示。信号激光器输出功率为25.7 mW,加在调制器的调制信号频率为20 MHz,调制电压峰峰值为3.5 V,调制器输出功率为6.3 mW(即发射天线的输出功率),空间传输距离为50 m,接收天线输出功率为23 μW,作为输入到混频器的信号光,本振激光器输出光功率0~20 mW可调,为了确保平衡探测器输入功率不大于1 mW,本实验采用3 dB的光纤衰减器将本振光功率衰减到1 mW以下。图6所示为空间相干光通信系统实物。

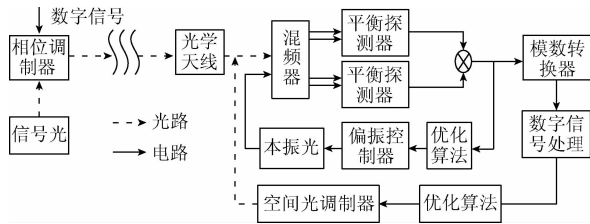


图5 空间相干光通信外差探测原理

Fig. 5 Principle diagram of space coherent optical communication heterodyne detection

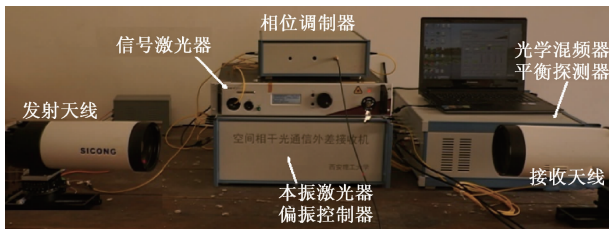
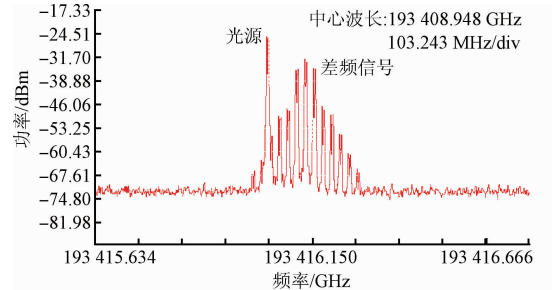


图6 空间相干光通信外差探测实物

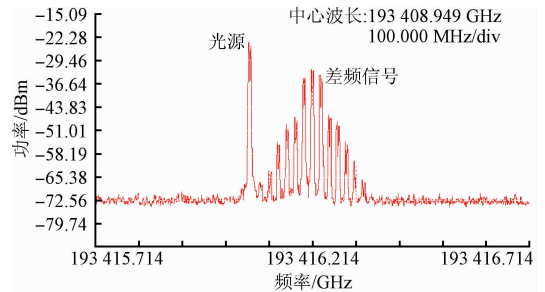
Fig. 6 Photo of space coherent optical communication heterodyne detection

实验前先用频谱分析仪记录的激光器输出光源和差频信号的频谱分布,如图7所示,图7(a)和(b)中单个冲击为激光器频谱,带边带的为差频信号频谱。可以看出,当激光器的中心频率稳定时,谱宽的随机变化会引起相

位调制器输出信号的中心频率发生随机漂移,导致混频器输出的差频信号频谱发生随机漂移。当相位调制器输出信号中心频率漂移过大时,混频器输出的差频信号带宽超过了平衡探测器的响应带宽,使得平衡探测器无输出信号。为了准确地探测平衡探测器的输出信号,研究人员必须使用响应带宽足够宽的平衡探测器,才能实现对外差信号的探测。



(a) The spectrums of light source and differential frequency signal



(b) 漂移后的光源和差频信号频谱  
(b) The spectrums of light source and differential frequency signal after drift

图7 光谱仪记录的光源和差频信号频谱

Fig. 7 The spectrums of light source and differential frequency signal recorded by spectrometer

图8所示为差频信号带宽为187 MHz时,平衡探测器输出的差频信号电压幅值,为26 V。图9(a)和(b)分别为当谱线宽度的随机展宽引起的差频信号带宽为500 MHz时,用200 MHz和40 GHz的平衡探测器探测输出的差频信号电压。由两图可知,响应带宽为200 MHz的平衡探测器根本无法探测到准确的差频信号。当改用响应带宽为40 GHz的平衡探测器时,示波器能够准确的显示差频信号,此时的输出信号幅值为9.6 V。

由此可知,激光器线宽对外差探测差频信号的带宽有很大的影响,当差频信号带宽增大2.673倍时,用响应带宽大的探测器探测到的差频信号幅值减小0.369倍(约等于 $1/2.673 = 0.374$ ),即差频信号带宽增加的倍数约等于信噪比下降的倍数。而空间相干光通信采用的光源频率一般在100 THz以上,激光器谱宽的微小漂移可能会引起信号光和本振光的差频信号频率变得非常大,可达到几百 MHz到数十 GHz量级。因此,空间相干光通

信必须采用谱线宽度稳定性非常好的窄线宽激光器,才能确保输出信噪比很好的差频信号。

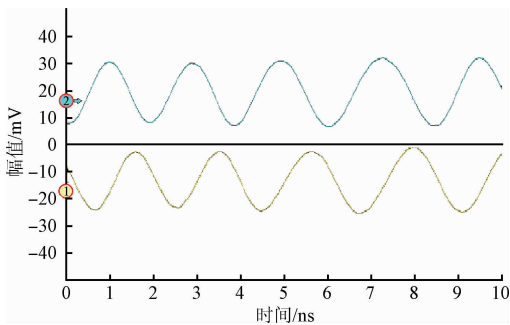
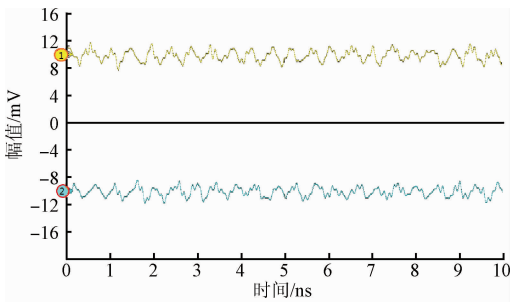
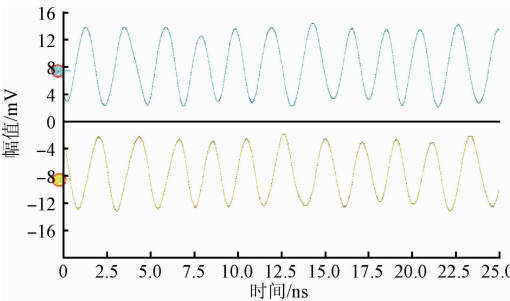


图8 差频信号带宽为187 MHz时输出的差频信号

Fig. 8 The output differential frequency signal when the differential frequency signal bandwidth  $\Delta f = 187$  MHz



(a) 用200 MHz平衡探测器  
(a) Using 200 MHz balanced detector



(b) 用40 MHz平衡探测器  
(b) Using 40 MHz balanced detector

图9 差频信号带宽为500 MHz时输出的差频信号

Fig. 9 The output differential frequency signals when the differential frequency signal bandwidth  $\Delta f = 500$  MHz

## 6 结 论

课题研究了激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响,结果表明:1)激光器线宽越宽,差频信号带宽就越大,而两光束达到探测器光敏面上的时间差 $\tau_d$ 的大小并不影响差频信号的带宽,只是当 $\tau_d \leq \tau_c$ 时,差频信号频谱中存在冲击函数成分,能更准确的探测差频信号;2)差频信号带宽随激光器线宽的增大而增大,差频信号带

宽增大2.673倍,输出信噪比就约下降1/2.673倍,且两光束到达探测器光敏面上的时间差越大、激光器的线宽越宽,信噪比下降越迅速;3)当探测器自身的特性参数:内增益、响应度和响应带宽都增大时,可以减缓信噪比随激光器线宽增大而减小的速度,但内增益和响应带宽过大,相应的噪声信号也越强,反而不利于信噪比的提高。因此,在进行外差探测是,不但要合理选择探测器的特性参数,更关键的是要对激光器的线宽加以稳定控制,使差频信号带宽能在较小的范围内被平衡探测器探测,进而提高外差探测的信噪比。

## 参考文献

- [1] 沈宙,马忠松. 高速卫星通信中全数字载波同步算法的研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(4):36-39. SHEN ZH, MA ZH S. Study of high speed satellite digital carrier synchronization algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33 (4): 36-39.
- [2] 孔英秀,柯熙政,杨媛. 大气湍流对空间相干光通信的影响研究[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(8):080601. KONG Y X, KE X ZH, YANG Y. Influence research of atmospheric turbulence on space coherent optical communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52 (8): 080601.
- [3] 王盟盟,董瑞芳,项晓,等. 基于外差检测原理的绝对测距性能理论研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1861-1868. WANG M M, DONG R F, XIANG X, et al. Theoretical research for absolute distance measurement based on heterodyne detection principle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1861-1868.
- [4] 曾玲,陈伟,陶金. 低信噪比正弦信号相位差测量算法对比研究[J]. 电子测量技术,2017,40(1):71-89. ZENG L, CHEN W, TAO J. Comparative study of the phase difference measurement algorithms for low signal to noise ratio sine signal [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40 (1): 71-89.
- [5] XING H Y, LU C X, ZHANG Q. Frequency modulated weak signal detection based on stochastic resonance and genetic algorithm [J]. Instrumentation, 2016, 3 (1): 41-49.
- [6] 王凌子,唐先锋,张晓光,等. PDM-CO-OFDM系统中基于判决引导与判决反馈的盲相位估计算法[J]. 中国激光,2014,41(3):0305001. WANG L Z, TANG X F, ZHANG X G, et al. Blind phase estimation algorithms based on decision-directed and decision feedback in PDM-CO-OFDM systems [J].

- Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3):0305001.
- [7] 王萍, 陈健, 由骁迪等. 光相干 QAM 信号的弹性 DAML 相位估计[J]. 光学学报, 2016, 36(8):0806007.  
WANG P, CHEN J, YOU X D. et al. Flexible decision-aided maximum likelihood phase estimation for optical coherent QAM signals[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8):0806007.
- [8] 张博, 刘云清. 相干通信系统中激光线宽与放大器个数问题[J]. 激光与红外, 2015, 45(1):9-11.  
ZHANG B, LIU Y Q. Research on laser line-width and number of amplifiers in coherent laser communication system[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1):9-11.
- [9] VISMARA F, GRKOVIC V, MUSUMECI F, et al. On the energy efficiency of IP-over-WDM networks[C]. IEEE Latin-American Conference, 2010:1-6.
- [10] 李磊, 赵长明, 高岚, 等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. 光学学报, 2007, 27(2):249-252.  
LI L, ZHAO CH M, GAO L, et al.. Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency laser[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2):249-252.
- [11] 刘彦飞, 代永红, 单欣, 等. 高帧频 CMOS 相机对光通信跟踪系统影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):1319-1325.  
LIU Y F, DAI Y H, SHAN X, et al. Analysis of the impact of high frame frequency CMOS camera on optical communication fine tracking system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6):1319-1325.
- [12] 黄春晖, 王雪津. 连续变量量子通信的研究与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1):1-9.  
HUANG CH H, WANG X J. Research and prospect on continuous variable quantum communication [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(1):1-9.
- [13] 刘继红, 张莹, 梁猛. 相干光纤通信系统对激光器线宽的要求[J]. 光通信技术, 2011, 35(12):46-48.  
LIU J H, ZHANG Y, LIANG M. Laser linewidth requirements for optical coherent communication systems[J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(12):46-48.
- [14] 李成强, 王挺峰, 张合勇, 等. 激光光源线宽对外差探测性能的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(8):084206.  
LI CH Q, WANG T F, ZHANG H Y, et al. Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection[J]. Acta Physical Sinica, 2016, 65(8):084206.
- [15] 单慧洁, 杨宏志, 杨苏辉, 等. 激光强度及相位噪声对光学双频探测的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(12):124-132.  
SHAN H J, YANG H ZH, YANG S H. et al. Effects of laser intensity fluctuation and phase noise in dual-frequency laser detection[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12):124-132.
- [16] 王永德, 王军. 随机信号分析基础[M]. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2011.  
WANG Y D, WANG J. Fundamentals of random signal analysis [M]. 3rd Ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [17] ROWE H E. Signal and noise in communication systems[M]. Princeton: Van Nostrand, 1966:34.
- [18] TOWNES C. Ideas and stumbling blocks in quantum electronics [J]. Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(6):547-550.

### 作者简介



孔英秀, 2002 年于西安石油大学获得学士学位, 2006 年于西安工业大学获得硕士学位, 2013 年于西安理工大学在读博士, 现为西安工业大学光电工程学院讲师, 主要研究方向为空间相干光通信与光电探测技术。  
E-mail: 403662045@qq.com

**Kong Yingxiu** received her B. Sc. degree from Xi'an University of petroleum in 2002, M. Sc. degree from Xi'an Technological University in 2006 and has been a doctoral student in Xi'an University of Technology since 2013. Now she is a lecturer in Xi'an Technological University. Her main research field is space coherent optical communication and optoelectric detection technology.



柯熙政, 1983 年于陕西工学院获得学士学位, 分别在 1992 年和 1996 年于中国科学院大学获得硕士学位和博士学位, 现为西安理工大学自动化学院教授, 主要研究方向为无线激光通信和综合导航系统。  
E-mail: xzke@263.net

**Ke Xizheng** received his B. Sc. degree from Shaanxi Institute of Technology in 1983, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree in 1992 and 1996 both from University of Chinese Academy of Sciences, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Xi'an University of Technology. His main research fields are FSO and integrated navigation system.