文章编号:1001-5078(2015)01-0009-03　　·激光应用技术·

相干通信系统中激光线宽与放大器个数问题

张　博,刘云清
(长春理工大学电子信息工程学院,吉林 长春 130022)

摘　要:针对相干光通信系统中的零差探测系统中的科斯塔斯环对整个系统的相位误差影响问题进行了深入的理论研究。论文分析了接收机的灵敏度、功率分光比、掺铒光纤放大器的个数对激光器线宽的影响。在设定条件下,利用仿真得到了在比特率和误码率一定的条件下,激光器线宽与接收机的灵敏度、功率分光比、掺铒光纤放大器的个数之间的关系,对系统中激光器线宽控制有一定的参考作用。

关键词:科斯塔斯环;相位误差;激光器线宽;掺铒光纤放大器的个数;功率分光比
中图分类号:TN249　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.01.002

Research on laser line-width and the number of amplifiers in coherent laser communication system

ZHANG Bo, LIU Yun-qing
(Changchun University of Science and Technology College of Electronic Information Engineering, Changchun 130022, China)

Abstract: In coherent optical communication system, the effect of Costas loop in homodyne detection system on phase errors of the entire system was theoretically studied. The impact of receiver sensitivity, power splitting ratio, the number of erbium-doped fiber amplifiers on laser line-width was analyzed. When the bit rate and bit error rate reached certain conditions, the relationships between laser line-width and the receiver sensitivity, the power split ratio, the number of the erbium-doped fiber amplifier were obtained through simulation, which provide certain reference for laser line-width control.

Key words: Costas; phase error; laser line-width; the number of EDFA; power splitting ratio

1　引　言

进入 20 世纪 90 年代后,随着商业卫星技术和宽带数据业务的发展,空间激光通信的研究发展开始加速。美国、欧洲、日本等国家都先后开展了关键技术研究和实验室模拟,技术日趋成熟[1]。在国内,由于技术的原因,对影响空间激光通信相干探测技术还不够成熟。本文针对相干技术中的零差检测技术,对整个科斯塔斯锁相环环路进行了较详细的理论分析[2],以特定的平衡探测、零差接收系统为研究对象,讨论了由于环路中存在着相位噪声、白噪声和散粒噪声对接收机灵敏度、激光器的线宽和功率分光比的影响。

2　相干探测的工作原理

零差探测方式需要本振光与信号光有严格相等

基金项目:国家 863"十二五"国家重点项目资助。
作者简介:张　博(1989 -),女,在读硕士,主要研究方向光电检测与光电探测技术。E-mail:710707753@qq.com
收稿日期:2014-05-08

的频率,并且要保持相对稳定的相位差。通信波段光信号频率一般在 100 THz 以上,激光器的微小漂移就可能造成信号光与本振光频率的频差变得非常大,可能达到数十 GHz 量级。因此,要求在接收端要有性能非常好的光学锁相环(OPLL)对接收到的信号光进行锁相,并且要求本振激光器具有调谐功能,能够根据接收到的信号光进行自动调节本振光的频率,达到相位跟踪目的。科斯塔斯光学锁相环是具有这种功能的常用结构。图 1 为科斯塔斯(COSTAS)光锁相环结构组成图[3]。

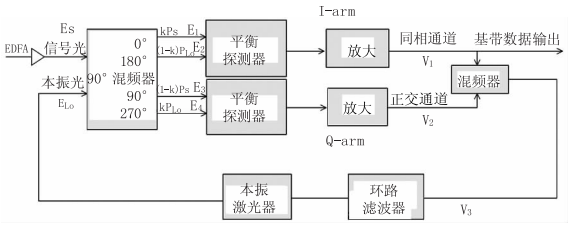

图 1 COSTAS 光锁相环结构组成图

如图 1 所示,科斯塔斯锁相环的鉴相器由一个 90°光混频器(optical hybrid)与前置平衡探测电路构成。信号光与本振光进入混频器后,以一定的相位关系耦合,然后进入前置的平衡探测电路,分别得到同相支路信号 I 与正交支路信号 Q,平衡探测器是将光场转换成电信号,一路信号直接得到基带信号输出,并且与正交支路信号相乘消除信号的调制,之后得到相位误差信号。相位误差信号经过环路滤波器的积分滤波后控制本振激光器的频率[4]。

从图 1 中看到,信号光和本振光的电场分别用 E_S 和 E_{LO} 表示:

$$E_S = \sqrt{P_S}e^{j\phi_s} + [a(t)+jb(t)]e^{j\omega_s t} \tag{1}$$

$$E_{LO} = \sqrt{P_{LO}}e^{j\phi_{LO}} \tag{2}$$

其中,P_S 和 P_{LO} 分别为信号光和本振光的光功率;ω_s 为信号光的频率;ϕ_s 和 ϕ_{LO} 为信号光和本振光的相位;$a(t)$ 为光放大器噪声的同相分量;$b(t)$ 为正交分量。而:

$$\phi_s(t) = \omega_s t + \frac{\pi}{2}d(t) + \phi_{NT}(t) - \frac{\pi}{2} \tag{3}$$

$$\phi_{LO}(t) = \omega_{LO}t + \phi_{NLO}(t) + \phi_c(t) \tag{4}$$

其中,$d(t)$ 为正在传输的数据码,取值为 1 或 -1;$\phi_C(t) = G_{VCO}\int_{-\infty}^{t} v_c(t')dt'$ 是本振激光器的相位;G_{VCO} 和 $v_c(t')$ 分别是本地振荡器的增益和输入的控制电压;$\phi_{NT}(t)$ 和 $\phi_{NLO}(t)$ 分别是信号光和本振光的相位噪声。把 $a(t)$,$b(t)$ 都看成是白噪声,假定 $a(t)$,$b(t)$ 的功率谱密度是相同的,那么可以表示为[3]:

$$\langle a^2\rangle = \langle b^2\rangle = Nh\upsilon(G_a - 1)n_S\gamma \tag{5}$$

其中,N 是掺铒光纤放大器(EDFA)的个数;$h\upsilon$ 是光子能量;G_a 是每个掺铒光纤放大器的增益;n_S 是自发发射因子;γ 是功率衰减的损失因数;电场 E_1、E_2、E_3、E_4 分别是光电探测器的输入。

I、Q 支路放大器输出的信号为:

$$v_1 = 2R\sqrt{k(1-k)P_SP_{LO}}d\cos\phi_e + N_1 \tag{6}$$

$$v_2 = 2R\sqrt{k(1-k)P_SP_{LO}}d\sin\phi_e + N_2 \tag{7}$$

其中,k 为功率分光比。由图 1 可以看出,v_1 和 v_2 经过混频器,即乘法器得到 v_3:

$$v_3 = v_1 \times v_2 = \frac{G^2}{2}\sin[2\phi_e(t)] + N(t) \tag{8}$$

在这里,N_1 和 N_2 分别表示 I、Q 支路的等效噪声。$G = 2R\sqrt{k(1-k)P_SP_{LO}}$,$N(t)$ 定义为 $N(t) = N_1(t)N_2(t) + G_1d(t)N_2(t) + G_2d(t)N_1(t)$,其中:

$G_1 = 2R(1-k)\sqrt{P_SP_{LO}}\cos\phi_e$,$G_2 = 2Rk\sqrt{P_SP_{LO}}\sin\phi_e$。PSK 调制信号 $d(t)$ 的功率谱密度是:

$$PSD_d(f) = T\left(\frac{\sin\pi fT}{\pi fT}\right)^2 \tag{9}$$

其中,T 定义的是每个数据码持续的时间,假设理想的低通滤波器的带宽 $B = R_b = \frac{1}{T}$。在这个系统中,采用一阶有源滤波器,$F(\omega)$ 是滤波器的传递函数,表达式为:

$$F(\omega) = \frac{1 + j\omega\tau_2}{j\omega\tau_1}$$

$$\tau_1 = \frac{G_c}{(2\pi f_n)^2} \tag{10}$$

$$\tau_2 = \frac{\zeta}{\pi f_n}$$

G_c 是整体的环路增益定义为 $G_c = 4R^2G_{vco}k(1-k)P_SP_L$;$f_n$ 和 ζ 分别是环路的固有频率和阻尼比。

通过对环路噪声带宽的进一步优化,从文献[5]中得到相位误差方差的最小值表达式:

$$\sigma^2_{\phi_{e,\min}} = \sqrt{\frac{\pi(1+4\zeta^2)\Delta v}{2\zeta^2}\left(\frac{\langle a^2\rangle}{P_s} + \frac{q}{2RkP_S}\right)\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\langle a^2\rangle}{P_s} + \frac{q}{2R(1-k)P_S}\right)B\right]} \tag{11}$$

其中，Δv 是激光器的线宽；q 是电荷；R 是探测器的响应度；$\langle a^2 \rangle$ 的表达式如式(5)所示。

那么系统的性能就可以用误码率的形式表示：

$$P_e = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{erfc}\left[\sqrt{\frac{2RP_S(1-k)}{qB+2R(1-k)\langle a^2\rangle B}}\cos\phi_e\right]\cdot \frac{1}{\sigma_{\phi_{e,\min}}\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{\phi_e^2}{2\sigma_{\phi_{e,\min}}^2}\right]d\phi_e \tag{12}$$

$\mathrm{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^{\infty}\exp(-y^2)dy$，在研究中由于 $(1-k)P_S$ 比较小，因此可以被忽略。

通过以上的公式推导过程，得到如图 2 所示的激光器的线宽在光放大器的个数取不同的值时与接收机灵敏度之间的关系。其中，$R_b = 10$ Gb/s，$P_e = 10^{-10}$。

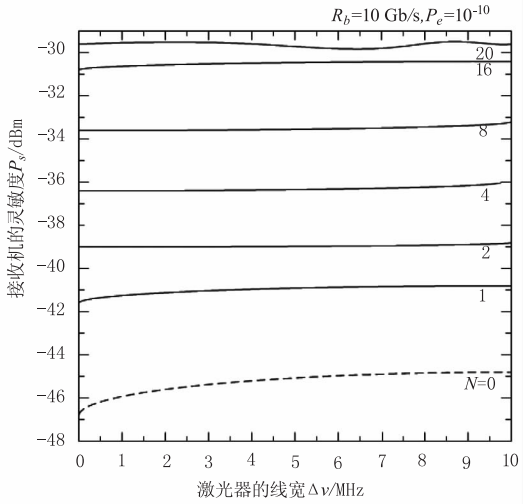

图 2　接收机灵敏度与激光器线宽在不同光放大器个数情况下的关系图

激光器的线宽在四种不同光放大器个数时与分光比的关系如图 3 所示。

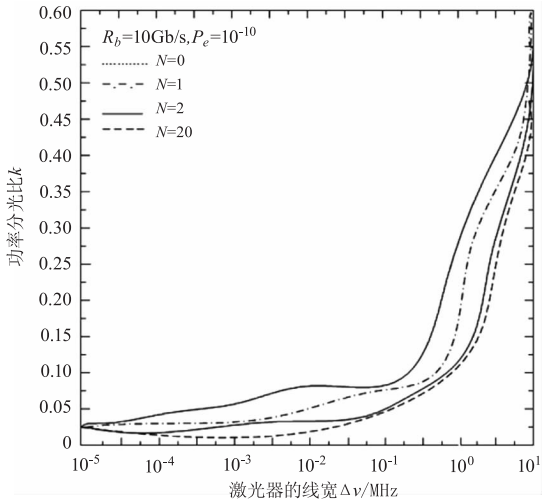

图 3　激光器的线宽在四种不同光放大器个数时与分光比的关系图

3　结果分析

在以上的计算中，对各参数进行了设置：考虑噪声带宽和捕获速度两方面的因素，确定锁相环的阻尼系数为 $\zeta = 1/\sqrt{2}$；探测器的响应度为 0.8；放大器的自发发射因子 n_s 为 2.0；误码率确定为 10^{-10}。并且假设所有放大器之间的间距是相同的。得到图 2 接收机灵敏度在 7 种光放大器个数情况下与激光器线宽之间的关系，即在 $R_b = 10$ Gb/s，$P_e = 10^{-10}$ 一定的情况下，要想获得更高的灵敏度，那么就要求掺铒光纤放大器的个数越来越多，但是，随着掺铒光纤放大器的个数的增多，会导致信号光和噪声同时进行放大，由于信噪比是一定的，同样不能提取出我们想要的信号，因此无论放大器的个数是多少，对激光器的线宽几乎没有影响。即便如此也不能够无限制的放置放大器，毕竟每个放大器之间有一定的间距，如果放置过多，会使系统变得庞大，对研究带来一定的困难。图 3 所示功率分光比与激光器线宽成正比例关系，若在激光器线宽一定的情况下，功率分光比与光纤放大器个数成反比例关系；若在功率分光比一定的条件下，激光器的线宽会随着光放大器个数的增多呈递增的趋势。

4　结　论

本文通过对相干光通信系统中的零差探测系统中的科斯塔斯环对整个系统的相位误差影响问题进行的深入研究。得出了在比特率、误码率和接收机灵敏度一定的情况下，由于输入的信号光的信噪比不变，光放大器的个数对激光器线宽没有明显的影响；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。

参考文献：

[1]　L G Kazovsky. Decision-driven phase-locked loop for optical homodyne receivers[J]. Light Ware Technol, 1985, LT-3(6): 1238 – 1247.

[2]　Y Chou, L Wang. Effect of optical amplifier noise on laser line-width requirements in long haul optical fiber communication systems with costas PLL receivers[C]. Journal of Light-wave Technology, 1996, 14(10): 2126 – 2134.

[3]　Ivan B Djordjevic. Homodyne PSK receivers with a costas loop for high-speed long-haul communications[C]. TELSIKS, 2001, 2: 769 – 772.

[4]　X. Klapperand X. Frankle. Phase-locked and frequency-feedback system[M]. New York: Acadmic Press, 1972: 21 – 22.