

激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率研究

孔英秀^{1,2}, 柯熙政¹, 杨媛¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响,提出了激光器线宽影响空间相干光通信链路传输误码率的计算方法。研究了湍流大气中激光器线宽对链路传输误码率的影响,建立了大气湍流中空间相干光通信链路传输误码率模型。分析了不同参数影响下激光器线宽对误码率的影响,通过计算发现,线宽增大1倍,误码率增加2.7倍左右;线宽增大一个数量级,相应的误码率也增大近一个数量级。

关键词 光通信; 激光器线宽; 大气湍流; 外差探测; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040603

Bit Error Rate of Laser Linewidth in Spatial Coherent Optical Communication Link

Kong Yingxiu^{1,2}, Ke Xizheng¹, Yang Yuan¹

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

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

Abstract We propose a calculation method of the bit error rate of space coherent optical communication link, to solve the influence of laser linewidth on the performance of space coherent optical communication system. The influence of the laser linewidth on the transmission error rate of the link in the turbulent atmosphere is studied, and the error rate model of the spatial coherent optical communication link in the atmospheric turbulence is established. The influence of different parameters on the bit error rate is analyzed, and the result of numerical settlement is given. It is found that, the linewidth increases by 1 times and the bit error rate increases by about 2.7 times; the linewidth increases by an order of magnitude and the corresponding bit error rate increases by nearly one order of magnitude.

Key words optical communications; laser linewidths; atmospheric turbulence; Heterodyne detection; bit error rate

OCIS codes 060.1660; 030.1640; 040.5160; 250.0040

1 引言

空间相干光通信系统中信号光经过远程湍流大气传输到接收端时,大气湍流引起的折射率随机起伏会导致信号光的振幅和相位发生随机波动,其中,振幅的随机波动表现为光强起伏,相位的随机波动表现为波前畸变,二者都会减小两光束混频时的信噪比,增加空间相干光通信系统的误码率(BER)。

同时,激光器中心波长和线宽的微小漂移也会给相干光通信系统带来附加的相位波动,进一步增大空间相干光通信系统的误码率,引起传输信号退化。光纤通信和光纤相干光通信系统的理论和实验研究结果表明,光色散在很大程度上不但降低了无中继传输距离,而且增加了光纤通信的误码率^[1-2],降低了远程通信的可靠性。自由空间光通信采用强度调制/直接探测(IM/DD)方式,要使接收端能有效

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61377080)

作者简介: 孔英秀(1977—),女,博士研究生,讲师,主要从事光通信技术方面的研究。E-mail: 403662045@qq.com

导师简介: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

地接收传输信号,必须大幅增加发射端的信号功率,才能弥补大气信道中的信号衰减^[3-5],且采用 IM/DD 方式,整个光频域的噪声信号都会直接影响接收信号的质量,严重时噪声信号甚至会淹没传输信号。空间相干光通信系统采用外差探测的方式,使信号光和本振光在接收端探测器光敏面上进行相干混频,用本振光对信号光进行有效放大,以实现微弱光信号的探测,大大减小了发射端的信号功率,为远程光通信提供了必要的保证^[6-8]。另外,探测器探测的信号为信号光和本振光的差频信号,只有差频频带范围内的噪声信号才能影响误码率,比起光纤通信和自由空间光通信,大大减小了噪声信号功率,从而降低了系统误码率^[9-10]。而激光器线宽的微小漂移对空间相干光通信系统误码率有很大的影响,特别是在湍流大气中,如果传输距离增加,误码率将会更大,进而影响了空间相干光通信系统的性能。

本文基于大气湍流影响下的空间相干光通信模型,考虑到激光器线宽对传输误码率的影响,建立了一个新的空间相干光通信链路传输误码率模型,并利用数值模拟分析了激光器线宽、大气湍流内外尺度、接收孔径直径、差频信号带宽等对系统误码率的影响。

2 空间相干光通信链路传输模型

空间相干光通信在接收端主要采用外差探测方式,主要是因为外差探测具有接近量子噪声限的探测灵敏度,但要实现对两光束差频信号的准确探测,需要用窄线宽激光器。然而激光器的线宽再窄也无法做到单波长,仍会有一定的谱线宽度,受温度和外界环境振动的影响,激光器输出光源的中心波长会发生微小漂移,线宽也会有一定的展宽。另外,空间

传输链路的大气湍流引起的到达角起伏、光强闪烁、波前畸变等现象,使得差频输出信号的信噪比下降,进而增加了信号的传输误码率。由实验分析可知,激光器中心波长的微小漂移和线宽展宽都是缓变过程。当外界条件稳定时,波长漂移和线宽展宽最终也会趋于稳定,但漂移幅度和线宽展宽程度都会影响差频信号带宽。对于相干光通信而言,差频信号带宽增大势必会增大探测器的响应带宽,同时也输入附加的噪声信号,导致信噪比下降,误码率上升。本文以双平衡外差探测系统为例,分析激光器的线宽对空间相干光通信链路传输误码率的影响。由于高斯光束经过远距离传输到达接收孔径时的波面往往被认为是平面波模型,故本文基于平面波传输模型进行分析,系统模型如图 1 所示,外差探测系统中所用的光源为准单色光源,其线宽很窄。假设两束光有相同的偏振态,传输信息通过二进制相移键控(BPSK)调制加载到信号光相位上,并经过湍流大气传输到接收端,根据 Rytov 理论,入射到光混频器的本振光场和信号光场分别为

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

$$E_S = A_S \exp\{i[\omega_S(t - \tau_d) + \phi_S(t - \tau_d)]\} \times \exp[\chi(r) + i\phi(r)], \quad (2)$$

式中: A_L 和 A_S 、 ω_L 和 ω_S 、 $\phi_L(t)$ 和 $\phi_S(t)$ 分别为本振光和信号光的振幅、角频率和初相位,且 $P_L = A_L^2/2$, $P_S = A_S^2/2$; τ_d 为两光束到达探测器光敏面上的时间差,由 τ_d 引起的相位差最终用激光器线宽来表示。假设本振光和信号光的初相位之差是一个平稳随机过程,且服从零均值高斯分布^[11],理论分析关系式为 $\Delta\phi(t, \tau) = \phi_S(t + \tau) - \phi_L(t)$, $\exp[\pm i\Delta\phi(t, \tau)] = \exp[-\Delta\phi^2(t, \tau)/2]$ 。其中 $\Delta\phi^2(t, \tau) = \Delta\omega |\tau|$, $\Delta\omega$ 为激光器的线宽, $\Delta\omega =$

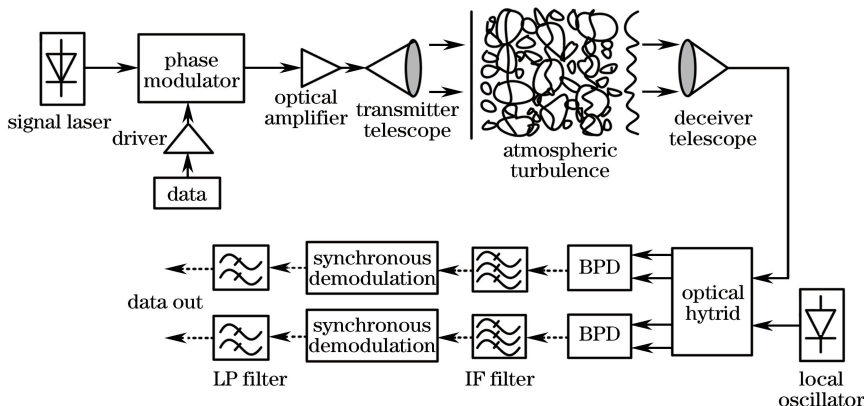


图 1 大气湍流影响下的空间相干光通信系统模型

Fig. 1 Spatial coherent optical communication system model influenced by atmospheric turbulence

$2\pi\Delta f$ 对应的相干时间为 $\tau_c = 2\pi/\Delta\omega$, Δf 为激光器线宽^[12]。 $\chi(r)$ 和 $\phi(r)$ 分别为大气湍流引起的对数振幅起伏和波前相位畸变。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^[9]

$$i = \frac{\beta W(r)}{2} \iint A_L^2 d^2 r + \frac{\beta W(r)}{2} \iint A_S^2 d^2 r + \beta W(r) \iint A_L A_S d(t) \times \cos[\Delta\omega_{IF}t - \omega_s \tau_d + \phi(r)] \times \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta\omega|\tau_d|\right) \times \exp[\chi(r)] d^2 r, \quad (3)$$

式中: $\omega_{IF} = 2\pi\Delta f_{IF}$ 为差频信号的角频率; Δf_{IF} 为差频信号带宽; β 为探测器的响应度; $W(r)$ 为接收机孔径函数。若用 D 表示接收机孔径直径,则当 $r \leq D/2$ 时, $W(r) = 1$; 当 $r > D/2$ 时, $W(r) = 0$ 。在相干光通信系统中, $A_L \gg A_S$, 故(3)式中第二项可忽略不计。第一项为本振光产生的散粒噪声,为外差探测系统的主要噪声,第三项为差频信号光电流,通过中频滤波器后,探测器输出的电流为差频电流 i_{IF} 和差频带宽内的散粒噪声 i_n ,其功率分别为

$$S = \langle (i_{IF} G)^2 R \rangle = \frac{R}{2} \left(\beta \frac{\pi}{4} G D^2 A_L A_S \right)^2 \times \exp(-\Delta\omega|\tau_d|) \cdot (\alpha_r^2 + \alpha_i^2), \quad (4)$$

$$N_S = \langle (i_n G)^2 R \rangle = \beta \Delta f_{IF} e G^2 R \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) A_L^2, \quad (5)$$

式中: G 为平衡探测器自身的内增益; R 为负载电阻; e 为电子电荷; α_r 和 α_i 分别为归一化光场的实部和虚部在接收机径面积内的积分,分别表示为

$$\alpha_r = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^{-1} \iint W(r) \exp[\chi(r)] \cos[\phi(r)] d^2 r, \quad (6)$$

$$\alpha_i = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^{-1} \iint W(r) \exp[\chi(r)] \sin[\phi(r)] d^2 r. \quad (7)$$

因此考虑大气湍流和激光器线宽影响下的相干光通信系统输出信噪比可表示为

$$R_{SN} = \frac{i_S^2 R}{i_N^2 R} = \frac{\pi D^2 \beta A_S^2 \exp(-\Delta\omega|\tau_d|) \alpha^2}{8e \Delta f_{IF}}, \quad (8)$$

式中: i_S 和 i_N 分别为本振光和信号光产生的电流; $\alpha^2 = \alpha_r^2 + \alpha_i^2$, 不存在大气湍流影响时空间相干光通信系统的信噪比为

$$R_{SN_0} = \frac{S}{N_S} = \frac{\pi D^2 \beta A_S^2 \exp(-\Delta\omega|\tau_d|)}{8e \Delta f_{IF}}. \quad (9)$$

由(8)式、(9)式可知,相干光通信系统中有湍流

和无湍流时的信噪比受激光器线宽的影响很大,而 $\alpha^2 = R_{SN}/R_{SN_0}$, 可表示为有湍流影响下信噪比和无湍流影响下信噪比的比值。为了方便计算,(6)式、(7)式中的积分可以表示为接收孔径面积内 N 个独立面元之和^[13]:

$$\alpha_r \cong \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp \chi_k \cos \phi_k, \quad \alpha_i \cong \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp \chi_k \sin \phi_k, \quad (10)$$

式中: N 为接收孔径面积内的独立面元总数^[14], 表达式为

$$N = \left\{ \frac{8}{D^2} \int_0^{D/2} r dr \exp[-3.44(r/r_0)^{5/3}] \right\}^{-1}, \quad (11)$$

式中: r_0 为大气相干长度,且 $r_0 = (0.423k^2 C_n^2 L)^{-3/5}$; k 为波数,且 $k = 2\pi/\lambda$; L 为传输距离。根据大数据理论, α_r 和 α_i 为渐进的高斯变量,故激光器线宽和大气湍流共同影响下 α^2 的概率密度函数可表示为^[13]

$$p_{\alpha^2}(\alpha^2) = \frac{1}{4\pi\sigma_r\sigma_i} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \exp\left[-\frac{(\alpha \cos \theta - \bar{\alpha}_r)^2}{2\sigma_r^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(\alpha \sin \theta - \bar{\alpha}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (12)$$

式中: $\bar{\alpha}_r$ 、 $\bar{\alpha}_i$ 和 σ_r^2 、 σ_i^2 分别为 α_r 和 α_i 的均值和方差。根据 Rytov 理论,大气湍流引起的信号光振幅起伏和波前畸变分别服从对数正态分布和高斯分布,计算得^[14]

$$\bar{\alpha}_r = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_\chi^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_\phi^2\right), \quad \bar{\alpha}_i = 0,$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2N} [1 + \exp(-2\sigma_\phi^2) - 2 \times \exp(-\sigma_\chi^2) \exp(-\sigma_\phi^2)],$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2N} [1 - \exp(-2\sigma_\phi^2)], \quad (13)$$

式中: σ_χ^2 为对数振幅方差。根据 Rytov 理论,对数振幅方差和光强起伏指数 σ_I^2 之间存在一定的关系^[15]

$$\sigma_\chi^2 = \frac{1}{4} \ln(1 + \sigma_I^2). \quad (14)$$

σ_ϕ^2 为波前畸变的相位波动方差,可用相位结构函数来描述,平面波的相位结构函数为

$$\alpha_\phi^2 = D_\phi(\rho) = 2.914 C_n^2 L k^2 \rho^{5/3}, \quad (15)$$

式中: C_n^2 为大气湍流结构常数; ρ 为光束截面上被探测的任意两点间的距离,且 $l_0 \leq \rho \leq L_0$; l_0 为湍流内尺度; L_0 为湍流外尺度。大气湍流引起光强起伏为^[16]

$$\sigma_I^2 = 1 + 0.85 (\sigma_R^2)^{-2/5}, \quad (16)$$

式中: σ_R^2 为 Rytov 方差,即 $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 。

3 空间相干光通信链路传输误码率模型

由于 α^2 受激光器线宽和大气湍流共同影响,利用雅克比变换,结合 α^2 的概率密度函数(12)式求得信噪比的概率密度函数为

$$p_{\text{SNR}}(R_{\text{SN}}) = \frac{1}{4\pi R_{\text{SN}_0} \sigma_r \sigma_i} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \times \exp\left[-\frac{(\sqrt{R_{\text{SN}}/R_{\text{SN}_0}} \cos \theta - \bar{\alpha}_r)^2}{2\sigma_r^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(\sqrt{R_{\text{SN}}/R_{\text{SN}_0}} \sin \theta - \bar{\alpha}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (17)$$

由(17)式可得,信噪比的概率密度函数受激光器线宽和大气湍流特征参数的影响。对于空间相干光通信同步外差探测系统来说,其平均误码率可表示为

$$P_E = \int_0^{\infty} dR_{\text{SN}} p(E | R_{\text{SN}}) p_{\text{SNR}}(R_{\text{SN}}), \quad (18)$$

式中: $p(E | R_{\text{SN}})$ 为外差探测系统的条件误码率,其表达式为

$$p(E | R_{\text{SN}}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{R_{\text{SN}}}/2\right), \quad (19)$$

其中: $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 表示余误差函数,条件误码率为信噪比的函数,同样也受激光器线宽和大气湍流的影响。由(17)~(19)式可得激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率的表达式

$$P_E = \frac{1}{4\pi R_{\text{SN}_0} \sigma_r \sigma_i} \times \int_0^{\infty} dR_{\text{SN}} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left[-\frac{(\sqrt{R_{\text{SN}}/R_{\text{SN}_0}} \cos \theta - \bar{\alpha}_r)^2}{2\sigma_r^2} - \frac{(\sqrt{R_{\text{SN}}/R_{\text{SN}_0}} \sin \theta)^2}{2\sigma_i^2}\right] \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{R_{\text{SN}}}{2}}\right) d\theta dR_{\text{SN}}. \quad (20)$$

虽然(20)式的积分式不能化简成解析表达式,但只要给出了光强起伏指数、相位波动方差和空间相干光通信的各项参数,就可通过数值计算确定激光器线宽和大气湍流共同影响下的相干光通信传输链路误码率。

4 数值分析

激光器线宽对空间相干光通信系统链路性能的影响可以通过(20)式分析讨论。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 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $\Delta f_{\text{IF}} = 200 \text{ MHz}$, $\beta = 0.9$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $R = 50 \text{ } \Omega$, $A_s^2/2 = 23 \text{ } \mu\text{W}$, $D = 0.02 \text{ m}$,

$\tau_d = 0.002 \text{ ms}$, 激光器线宽的变化范围为 $1 \sim 100 \text{ MHz}$ 。根据(20)式和相应的参数,分别确定不同大气参数影响下激光器线宽对误码率的影响。

图2为湍流强度不同时激光器线宽对相干光通信链路误码率的影响。数值模拟中,水平传输距离取 1000 m ,湍流内尺度取 0.002 m 。从图2可以看出,信号光在近地面传输时,湍流强度数量级不变的情况下,湍流强度系数从 0.7 增加到 2.7 时,相应的误码率会增加两个数量级。随着激光器线宽的增大,误码率均呈现上升趋势,线宽每增加 1 倍,相应的链路误码率会增大 2.7 倍左右,且线宽越宽,误码率增大越迅速。可见,信号光在近地面水平传输时,激光器线宽的增大和湍流强度的微小变化都会引起误码率的剧烈变化。在保证湍流强度稳定的情况下,传输距离对误码率的影响也很大,图3为传输距离不同时激光器线宽对相干光通信链路误码率的影响。数值模拟中近地面附近的大气湍流结构常数 C_n^2 取值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,湍流内尺度为 0.002 m 。由图3可见,链路传输误码率随激光器线宽的增大而增加的程度完全一样,线宽每增加 1 倍,相应的链路误码率会增大 2.7 倍左右,且线宽越宽,误码率增大越迅速。传输路径越长,相干光通信系统链路传输误码率也会越大。

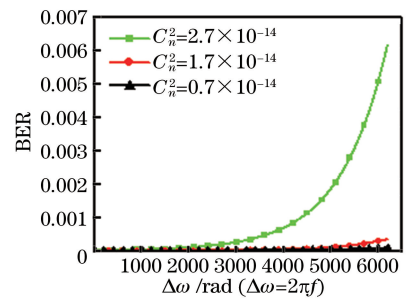


图2 湍流强度不同时激光器线宽对误码率的影响
Fig. 2 Effect of laser linewidth on BER when turbulence intensities are not same

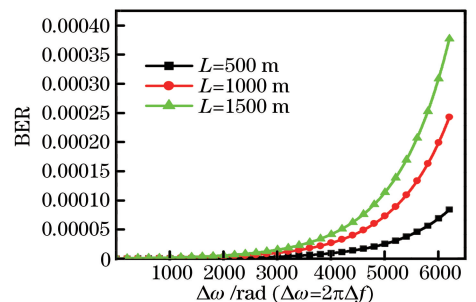


图3 传输距离不同时激光器线宽对误码率的影响
Fig. 3 Effect of laser linewidth on BER when transmission distances are not same

图4为激光器线宽不同时误码率随湍流不均匀尺度的变化关系。数值模拟中近地面附近的大气湍流结构常数 C_n^2 取值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,传输距离为1000 m,湍流内尺度 $l_0 = 0.002 \text{ m}$,湍流外尺度 $L_0 = 10 \text{ m}$ 。由图4可得,相干光通信链路的误码率随激光器线宽的增大而增大,且线宽增大一倍,传输链路的误码率增加1.1倍。当 ρ 从内尺度到外尺度之间变化时,相干光通信系统传输链路的误码率先减小后增大,当 ρ 等于湍流内尺度时,系统传输链路的误码率最大,当 $\rho = 4l_0$ 时,误码率最小。当 ρ 增大一个数量级后,相干光通信系统传输链路的误码率保持不变。这是因为当湍流尺度很小,且 $\rho = l_0$ 时,湍流大气中不同折射率的小尺度湍涡较多,折射率不均匀性对波前的影响较大。当 $\rho > l_0$ 时,小尺度湍涡折射率的不均匀性对波前畸变的影响相对较小,原因是光束所经历的小尺度湍涡的统计数量上基本相同,相位起伏也基本相同,因此误码率较低。当 ρ 继续增大,但 $\rho \ll L_0$ 时,大尺度湍涡折射率的不均匀性对光束波前畸变的影响也不大,因为大尺度湍涡一般覆盖了光束各条光线的传输路径,可以认为各条光线经历了相同的相位改变,故误码率在湍流外尺度比光束截面上任意两点的距离大到10倍后,误码率保持不变。

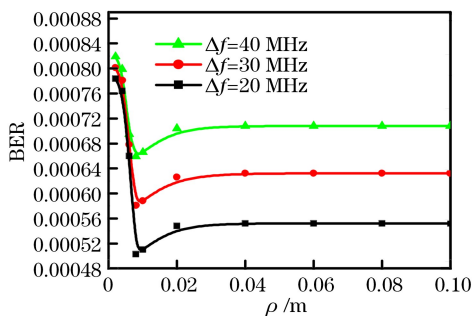


图4 激光器线宽不同时湍流尺度对误码率的影响

Fig. 4 Effect of turbulence scale on BER when linewidths are not same

图5为差频信号带宽不同时误码率随激光器线宽的变化关系。由图5可得,当差频信号带宽一定时,出差频信号误码率随激光器线宽的增大而增大,当激光器线宽增大一个数量级时,误码率也相应增加近一个数量级,且差频信号带宽越大,误码率增大越严重。这是因为当激光器的线宽随机展宽时,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吉赫兹的量级,甚至超出了平衡探测器的响应带宽。假定探测

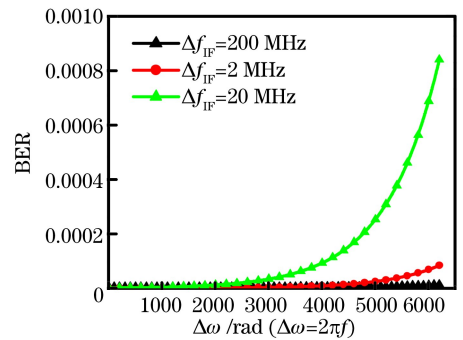


图5 差频信号带宽不同时激光器线宽对误码率的影响

Fig. 5 Effect of laser linewidth on BER when difference frequency signal bandwidths are not same

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,从而使出差频信号的误码率增大。

根据以上分析可知,空间相干光通信系统中外差探测信号的误码率受激光器线宽和湍流强度的影响很大。激光器线宽越宽,误码率越大,但线宽增加不会导致差频信号不可检测。只要探测器的线宽足够宽,外差信号就可以被检测到,只是差频信号误码率会大大增加。湍流强度越强,误码率越大,湍流强度过大时外差信号消失。

5 结论

研究了激光器线宽对空间相干光通信系统链路误码率的影响,可得以下结论。

1) 激光器线宽越宽、湍流强度越强、传输距离越远,对相干光通信系统链路传输误码率的影响越严重。随着激光器线宽的增大,误码率呈现上升趋势,线宽每增加1倍,相应的链路传输误码率会增大1.1倍左右,且线宽越宽,误码率增大越迅速。传输距离越长,误码率也越大;湍流强度增大时误码率也随之增加,严重时传输信号消失。

2) 当被探测光束截面上任意两点间距离 $\rho = l_0$ 时,空间相干光通信系统链路误码率最大,当 $\rho = 4l_0$ 时误码率最小;当 $10l_0 \leq \rho \leq L_0$ 时,传输链路的误码率保持不变,且线宽越宽,误码率越大。

3) 差频信号带宽随激光器线宽的增大而增大,激光器线宽越宽、差频信号的带宽越大,传输链路误码率越大,当激光器线宽增大一个数量级时,误码率也相应增加大约一个数量级。

综合以上结论可以发现,激光器线宽、大气湍流强度、湍流内尺度、外尺度、被探测光束截面上两点

间的距离和差频信号带宽都对空间相干光通信系统链路误码率有很大影响。在实际应用中,空间相干光通信系统链路的误码率一般要求达到 10^{-9} 左右。空间相干光通信系统链路设计时,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,进而减小外差探测的误码率。

参 考 文 献

- [1] Huang Y, Fu S N, Liu B, *et al.* Optimization of linear optical sampling analog front-end and test for 128 Gb/s signals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0206002. 黄炎, 付松年, 刘彬, 等. 线性光采样模拟前端研制与 128 Gb/s 信号测试[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0206002.
- [2] Jiang L, Yan L S, Yi A L, *et al.* Adaptive dispersion monitoring for polarization-multiplexed coherent optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 31(11): 1106006. 蒋林, 闫连山, 易安林, 等. 偏振复用相干光纤通信系统中的自适应色散监测[J]. *光学学报*, 2014, 31(11): 1106006.
- [3] Shaulov G, Patel J, Whitlock B, *et al.* Simulation-assisted design of free space optical transmission systems [C]. *IEEE Military Communications Conference*, 2005, 2: 918-922.
- [4] Han L Q, You Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0706004. 韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0706004.
- [5] Zhang H Y, Li H Z, Xiao D Y, *et al.* Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0405002. 张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究星地链路激光通信地面站址选择及大气影响研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0405002.
- [6] Tan Z K, Ke X Z. Mixing efficiency in coherent detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100605. 谭振坤, 柯熙政. 相干探测系统中的混频效率[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100605.
- [7] Kong Y X, Ke X Z, Yang Y. Influence research of atmospheric turbulence on space coherent optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080601. 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.
- [8] Vismara F, Grkovic V, Musumeci F, *et al.* On the energy efficiency of IP-over-WDM networks [C] // *Proceedings of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, 2010: 1-6.
- [9] Wang Q Z, Hu Y, Lin C J. Photoelectric detection technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1994: 208-211. 王清正, 胡渝, 林崇杰. 光电探测技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994: 208-211.
- [10] Kikuchi K. Coherent transmission systems [C] // *Proceedings of 2008 34th European Conference on Optical Communication*, 2008: 1-39.
- [11] Lange R, Smutny B, Wandernoth B, *et al.* 142 km, 5.625 Gbps free-space optical link based on homodyne BPSK modulation[C]. *SPIE*, 2006, 6105: 61050A.
- [12] Jiang C H, Yang J H, Zhang L J, *et al.* Schematic design and simulation of new Doppler imaging laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 411-416. 姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 等. 新型多普勒成像激光雷达原理设计与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 411-416.
- [13] Cagigal M P, Canales V F. Speckle statistics in partially corrected wave fronts [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(14): 1072-1074.
- [14] Belmonte A, Kahn J M. Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques [J]. *Optics Express*, 2008, 16 (18): 14151-14162.
- [15] Rao R Z, Gong Z B, Wang S P, *et al.* Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in the atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 36-40. 饶瑞中, 龚知本, 王世鹏, 等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 36-40.
- [16] Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005: 183-184. 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 183-184.