

天地一体化信息网络中信号光束偏移 对卫星混沌激光安全通信系统性能影响

李 密, 陈 强, 曾 丞, 汪 学, 王祎思, 陈向飞

(南京大学现代工程与应用科学学院, 智能光传感与调控技术教育部重点实验室, 江苏 南京, 210093)

摘 要: 研究信号光束偏移对天地一体化信息网络中卫星混沌激光安全通信系统性能的影响, 推导由信号光束偏移引起的外失配与内失配影响的系统误码率模型。基于此误码率模型进行数值仿真, 研究信号光束偏移如何引起内外失配进而影响系统误码率性能。研究结果表明, 光束漂移会在指向误差基础上进一步增大外失配与内失配, 从而影响系统性能。当指向误差较小时, 优化光束漂移对系统性能提升更大; 当指向误差较大时, 优化内失配对系统性能提升更大。研究结果对卫星混沌激光安全通信系统的实际工程设计具有重要参考意义, 并为将地面高速混沌激光安全技术推广到天地一体化领域奠定基础。

关键词: 天地一体化信息网络; 指向误差; 光束漂移; 卫星激光通信; 卫星混沌安全系统

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021020

Effect of Optical Signal Beam Shift on the Performance of Satellite Chaos Laser Safety Communication System under Space-Integrated-Ground Information Network

LI Mi, CHEN Qiang, ZENG Cheng, WANG Xue, WANG Yisi, CHEN Xiangfei

Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, College of Engineering and Applied Sciences,
Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The effect of beam center shift on the performance of satellite chaos laser safety communication system in space-integrated-ground information network was studied, the bit error rate (BER) formulae with external and internal mismatch caused by beam center shift was conducted. Based on the BER formulae, the effect of beam center shift on external and internal mismatch and system performance was analyzed. The results show that beam wander will further increase external and internal mismatch based on pointing error then affect system performance. When pointing error is relatively small, optimizing beam wander will improve system performance more, and when pointing error is relatively large, optimizing internal mismatch will improve system performance more. The research results of this paper have important reference significance for the actual engineering design of satellite chaos laser safety communication system, and lay the foundation for the promotion of terrestrial high-speed chaos laser safety technology to the field of space-integrated-ground.

Keywords: space-integrated-ground information network, pointing error, beam wander, satellite laser communication, satellite chaos safety system

收稿日期: 2021-05-17; **修回日期:** 2020-06-05

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (No. KTHY-003); 国家重点研发计划 (No. 2020YFB2205803); 中央高校基本科研业务费专项 (No. 021314380171); 江苏省自然科学基金面上项目 (No. BK20201251); 国家自然科学基金 (No. 61205045)

Foundation Items: Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province under Grant (No. KTHY-003), National Key Research and Development Program of China under Grant (No. 2020YFB2205803), Fundamental Research Funds for the Central Universities under Grant (No. 021314380171), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China under Grant (No. BK20201251), National Natural Science Foundation of China under Grant (No. 61205045)

1 引言

随着信息化时代的到来以及空间技术的发展,空间通信有着向网络化方向发展的趋势与需求^[1]。天地一体化信息网络对国家安全、经济发展等方面有着重要的保障作用,也受到了越来越多国家与地区的关注^[2]。天地一体化信息网络包括天基网络、地面互联网与移动通信网^[1-3],我国空间通信网络有着“天弱地强”的特征^[4],加强天基网络的建设对天地一体化信息网络发展有着重要意义。卫星激光通信技术可被应用于天基通信网络下多种链路^[4],向着高速率、高可靠、小型化等方向发展^[5],有着良好的发展前景,同时也面临着一些挑战。

当激光信号通过光学天线准直再经过上千千米的传输后,到达接收端的光斑半径将显著变大,而随着卫星伴飞技术以及新型探测器技术的逐渐成熟,太空中大量部署的间谍卫星给接收端处的信息安全带来了很大的风险。目前传统算法加密技术随着量子计算机的出现面临着很大的挑战,已经引起全球顶级密码学专家的关注。因此,寻求一种既能适合现阶段卫星激光通信系统的发展特点,又能够很好地融合到天地一体化信息网络中的加密技术成为一个紧迫的关键技术问题。

混沌激光安全技术可以将待传光信号掩藏在杂乱无章的混沌载波中,使敌方无法获取有效信息,而我方通过混沌解密技术保持正常通信。此外,混沌激光硬件安全技术对待传信号的调制方式不敏感,将混沌安全解密系统做成模块化后,可以通过光学接口在光路上与天地一体化信息网络中各种卫星激光通信系统全部实现无缝衔接,做到“即插即用”。因此,将地面混沌激光硬件安全技术推广到卫星激光通信链路中对于提升我国天地一体化信息网络的安全具有重要工程意义和价值。

2012年Rulikov等^[6]进行了空间链路下的混沌通信实验,初步验证了将混沌安全技术应用于空间信道的可能性,但是将混沌硬件安全技术引入天地一体化卫星激光通信链路中还需要考虑诸多实际影响因素。其中,当激光信号在空间链路中传输时,由于卫星平台振动以及大气湍流等影响,会使光信号产生指向误差与光束漂移现象^[7-8],从而使得接收端处的光束中心发生随机偏移。在指向误差研究方面,参考文献[9]研究了零视轴误差与非零视轴误差下指向误差对Malaga大气湍流信道下自由空间光路的影响,并给出了相应误码率闭合表达式。参考文献[10]研究了指向误差对星间激光通信链路的平均误码率影响,并给出Marcum Q函数的闭式表达式来计算瞬时通道增益。在光束漂移研究方面,参考文献[11]将光束漂移理论扩展至非Kolmogorov湍流,推导了非Kolmogorov湍流中光束漂移的一般解析表达式。参考文献[12]研究了

强湍流下光束漂移对自由空间链路的影响,并计算了强湍流下平均光束漂移和链路可用性。目前,指向误差和光束漂移效应在传统卫星激光通信系统中已经取得了很好的解决效果,但是混沌安全技术对光信号十分敏感,指向误差与光束漂移均会造成接收端信号的光束偏移,从而对天地一体化信息网络中卫星混沌激光安全通信系统性能造成影响。因此,开展指向误差和光束漂移效应引起的光束偏移对天地一体化信息网络中卫星混沌硬件激光安全系统的性能影响研究具有重要意义。

2 信号光束偏移对系统的影响原理

指向误差与光束漂移均会使信号光束产生随机偏移。指向误差与光束漂移对卫星混沌激光安全通信系统性能影响的原理如图1所示。混沌信号由光电反馈结构产生^[13],由激光器LD1、马赫曾德尔调制器MZ1、光纤延迟线、光电探测器APD3和射频放大器RFA1组成。待传输电信号通过调制器MZ3与激光器LD3转变为光信号,然后通过耦合器加载进混沌环路中,信号光与发射端混沌载波被掺铒光纤放大器EDFA1放大并在空间信道中传输。当光在空间信道中传输时将受到指向误差与光束漂移的影响,指向误差与光束漂移将使得实际光束中心与探测器中心产生随机偏移。而接收端探测器由于接收面积有限而且受到信号光束偏移影响将造成接收端光强衰减,因此接收端的光功率被指向误差与光束漂移影响,使得接收端光功率由 P_T 变为 $P_T(r_z)$ 。

在接收端信号光与发射端混沌载波被接收并被耦合器分为两路,其中一路直接被雪崩光电二极管(APD1)探测到。根据参考文献[14],此时APD1探测到的信号会被指向误差与光束漂移影响,可写为式(1)

$$P_x = \frac{1}{4} G_{\text{EDFA2}} P_T(r_z) \cos^2 \left(\frac{\pi}{2V_{\pi1}} x(t) + \phi_1 \right) + \frac{1}{4} G_{\text{EDFA2}} d P_T(r_z) m(t) \quad (1)$$

其中, G_{EDFA2} 为接收端掺铒光纤放大器EDFA2的放大增益倍数, d 为掩膜比, $V_{\pi1}$ 是发射端的半波电压, ϕ_1 是发射端的固定相位偏移, $x(t)$ 是MZ1在时间 t 的反馈电压, $m(t)$ 是信号, $P_T(r_z)$ 是被指向误差与光束漂移影响的接收端光功率,如式(2)所示^[15]

$$P_T(r_z) = P_T \exp \left(-\frac{2r_z^2}{W^2} \right) \quad (2)$$

其中, $P_T = G_{\text{EDFA1}} \alpha P_i$ 是被EDFA放大且被大气衰减的接收端光功率, G_{EDFA1} 是发射端EDFA1的放大增益倍数, $\alpha = \alpha_{\text{loss}} D_r^2 / (2W^2)$ 是大气损耗, α_{loss} 是损耗系数, D_r 是接收半径, $W = W_0 + \theta L / 2$ 是接收端光束半径, W_0 是发射端光束

半径, θ 是束散角, L 是链路长度^[16], P_1 是LD1产生的光功率, r_z 是光束中心与探测器中心之间的瞬时偏移距离。

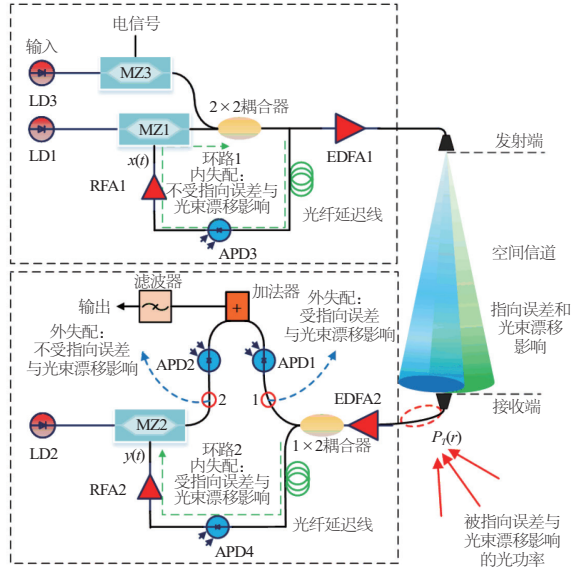


图1 指向误差与光束漂移对卫星混沌激光安全通信系统性能影响原理

另一路信号将进入接收端混沌载波产生环路, 此时被指向误差与光束漂移影响的光功率将影响接收端混沌载波信号的产生过程。接收端混沌产生结构与接收端类似, 接收端混沌载波被雪崩光电二极管 (APD2) 探测到, 根据参考文献[14], APD2所探测到的信号可写为式(3)

$$P_y = P_2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2V_{\pi 2}} y(t, r_z) + \phi_2 \right) \quad (3)$$

其中, P_2 是LD2产生的光功率, $V_{\pi 2}$ 是接收端半波电压, ϕ_2 是接收端的固定相位偏移, $y(t, r_z)$ 是MZ2在时间 t 被指向误差与光束漂移影响的反馈电压。

在没有指向误差与光束漂移影响时, 发射端与接收端混沌载波可大致相消并解调出信号。但指向误差与光束漂移的存在使得接收端光强衰减, 进而对系统引入了误差。基于式(1)与式(3), 在此系统中存在着两种失配, 一种失配发生在混沌环路结构外的 $1/4G_{EDFA2}P_T(r_z)$ 与 P_2 之间 (图1中APD1与APD2前), 被称为混沌环路外部失配, 简称为外失配; 另外一种失配发生在混沌载波产生环路 $x(t)$ 和 $y(t, r_z)$ 之间 (图1中混沌环路1与环路2之间), 被称为混沌环路内部失配, 简称为内失配。下面将具体分析指向误差与光束漂移引入的内外失配对天地一体化信息网络中卫星混沌激光安全通信系统的性能影响。

3 误码率模型推导

3.1 指向误差与光束漂移联合影响说明

在通信系统中通常使用误码率 (Bit Error Rate, BER) 来衡量系统的通信性能, 而在长期通信系统中可使用系统平均BER进行分析^[17]。天地一体化信息网络中卫星混沌激光安全通信是一个长期通信的过程, 因此本文将使用系统平均BER来分析卫星混沌激光安全通信系统的性能。

首先对指向误差与光束漂移的影响进行说明。指向误差包括视轴误差与抖动误差。指向误差下光束偏移的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) $\rho_p(r_x)$ 可以由瑞利分布给出^[7]

$$\rho_p(r_x) = \frac{r_x}{\sigma_s^2} \exp \left(-\frac{r_x^2 + A^2}{2\sigma_s^2} \right) I_0 \left(\frac{r_x A}{\sigma_s^2} \right) \quad (4)$$

其中, r_x 是指向误差影响下光束中心与探测器中心偏移; $A=A_s L$ 是视轴误差; $\sigma_s=\sigma_j L$ 是抖动误差, L 是链路长度; A_j 和 σ_j 是视轴误差和抖动误差的单位参数; I_0 是修正后的零阶贝塞尔函数。

而在光束漂移下光束偏移的PDF $\rho_b(r_y)$ 可以由瑞利分布给出^[8]

$$\rho_b(r_y) = \frac{r_y}{\sigma_r^2} \exp \left(-\frac{r_y^2}{2\sigma_r^2} \right) \quad (5)$$

其中, σ_r^2 是光束漂移方差^[18], 由式(6)给出

$$\sigma_r^2 = 2.07 \int_{h_0}^H C_n^2(z) (L-z)^2 W(z)^{-1/3} dz \quad (6)$$

其中, $W(z)=W_0+\theta_z/2$ 是在位置 z 上的光束半径, $C_n^2(z)$ 是在位置 z 上的大气折射率结构参数。

可以使用随机变量 R_x 来表示指向误差 $\rho_p(r_x)$ 的分布, 随机变量 R_y 表示光束漂移 $\rho_b(r_y)$ 的分布。在指向误差和光束漂移的影响下, 光束中心会产生随机偏移, 且受到的影响为指向误差与光束漂移的叠加, 因此分布为 $R_z=R_x+R_y$, 指向误差和光束漂移影响下, r_z 的PDF为指向误差PDF与光束漂移PDF的卷积^[19]

$$\rho_{bp}(r_z) = \rho_b(r_y) * \rho_p(r_x) \quad (7)$$

3.2 内外误差影响下误码率模型推导

传统通信系统的BER可写为式(8)^[20]

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{u}{2\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{K_f d}{2\sqrt{2} \langle n^2 \rangle} \right) \quad (8)$$

其中, u 是信噪比, $\langle n^2 \rangle$ 是混沌失配噪声, d 是掩膜比。

然而对于天地一体化信息网络中被信号光束偏移影响的卫星混沌激光安全通信系统, 指向误差与光束漂移

会带来内外失配,因此式(8)需要被修正。下面说明外失配与内失配对系统误码率的影响。

首先对外失配进行说明,APD1探测的电流幅度会被指向误差与光束漂移影响,可被表述为 $K_1(r_z)$,APD2探测的电流幅度不会被指向误差与光束漂移影响,可被表述为 K_2 。基于参考文献[14, 20], $K_1(r_z)$ 和 K_2 如下所示

$$K_1(r_z) = \frac{1}{4} G_{\text{EDFA2}} P_T(r_z) \frac{G\eta}{h_p \nu} T_s, \quad K_2 = P_2 \frac{G\eta}{h_p \nu} T_s \quad (9)$$

其中, e 是电荷量, G 是光电探测器APD的增益系数, η 是量子系数, ν 是激光频率, h_p 是普朗克常量, T_s 是信号光的脉冲时间。

在没有指向误差与光束漂移影响时, $K_1(r_z)$ 应该等于 K_2 ,然而指向误差与光束漂移会引入外失配 $\Delta K(r_z)$,如下所示

$$\Delta K(r_z) = K_2 - K_1(r_z) \quad (10)$$

对内失配进行说明,发射端的光电振荡增益 β_1 不会被指向误差和光束漂移影响,接收端的光电振荡增益会被指向误差和光束漂移影响,可被表述为 $\beta_2(r_z)$ 。基于参考文献[14, 20], β_1 和 $\beta_2(r_z)$ 表达式如下

$$\beta_1 = \frac{\pi A_1 G_1}{2V_{\pi 1}} \frac{1}{2} P_1, \quad \beta_2(r_z) = \frac{\pi A_2 G_2}{2V_{\pi 2}} \frac{1}{4} P_T(r_z) G_{\text{EDFA2}} \quad (11)$$

其中, A_1 是发射端的混沌反馈响应度, G_1 是发射端的RFA1的放大增益倍数, A_2 与 G_2 是接收端的对应参数。

在没有指向误差与光束漂移影响时, β_1 应该等于 $\beta_2(r_z)$,然而指向误差与光束漂移会引入内失配 $\Delta\beta(r_z)$,如式(12)所示

$$\Delta\beta(r_z) = \beta_1 - \beta_2(r_z) \quad (12)$$

基于参考文献[20],内失配与器件失配都将影响同步误差,将被指向误差与光束漂移影响的混沌同步误差表示为 $\langle \varepsilon^2(r_z) \rangle$

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon^2(r_z) \rangle = & \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta T}{\tau} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\beta(r_z)}{\beta_1} \right)^2 + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{\Delta\tau}{\tau} \right)^2 - \\ & 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{\Delta\beta(r_z)}{\beta_1} \frac{\Delta\tau}{\tau} - 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{\Delta T}{\tau} \frac{\Delta\tau}{\tau} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, ΔT 是时延失配, τ 是高响应截止时间, $\Delta\tau$ 是高响应时间的失配。

基于参考文献[20],混沌失配噪声 $\langle n^2(r_z) \rangle$ 将会被内失配影响并且可以被表示为式(14)

$$\langle n^2(r_z) \rangle = \frac{1}{2} K_1^2(r_z) \left[\langle \varepsilon^2(r_z) \rangle + (\Delta\phi)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta K(r_z)}{K_1(r_z)} \right)^2 \right] \quad (14)$$

其中, $\Delta\phi$ 是相位失配。

此时信号将被外失配影响,因此应该等于 $K_1(r_z)d$,被外失配和内失配影响的BER表示如下

$$\text{BER}_{\text{chaos}}(r_z) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{u(r_z)}{2\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{K_1(r_z)d}{2\sqrt{2\langle n^2(r_z) \rangle}} \right) \quad (15)$$

在指向误差与光束漂移引起光束半径偏移 r_z 连续变化时, $\text{BER}_{\text{chaos}}(r_z)$ 也会连续变化。此时指向误差和光束漂移影响下的系综平均BER可以被表示为 $\text{BER}_{\text{chaos}}(r_z)$ 与指向误差和光束漂移联合概率密度函数 $\rho_{bp}(r_z)$ 的积分,系综平均BER表示为式(16)

$$\text{BER} = \int_0^{+\infty} \text{BER}_{\text{chaos}}(r_z) \rho_{bp}(r_z) dr_z \quad (16)$$

4 数值仿真分析

上文推导了信号光束偏移影响下卫星混沌激光安全通信系统的误码率模型,下面将进行数值仿真分析。首先将分析不同抖动误差下光束漂移对系统性能的影响,然后分析不同视轴误差下光束漂移对系统性能的影响。数值仿真分析将基于以下参数:链路损耗系数 $\alpha_{\text{loss}}=1$,信号掩膜比 $d=1.2$,链路长度 $L=38\,000\text{ km}$,接收半径 $D_r=0.6\text{ m}$,数据速率为 1 Gbit/s ,高响应截止时间 $\tau=25\text{ ps}$,时延误差 $\Delta T=1\text{ ps}$,高响应截止时间比率 $\Delta\tau/\tau=0.01$ 。指向误差与光束漂移均会导致信号光束偏移。下面将对不同抖动误差与不同视轴误差下,单指向误差影响与指向误差和光束漂移综合影响进行分析。

4.1 不同抖动误差下光束漂移影响

为了方便分析指向误差与光束漂移引入的外失配与内失配的影响,将分别分析外失配与内失配。在分析外失配时,忽略内失配的影响;分析内失配时,忽略外失配的影响;最后分析外失配与内失配共同作用对系统的性能影响。

首先对外失配进行分析,此时内失配 $\Delta\beta$ 设置为0。将视轴误差 A_j 固定为 $3\text{ }\mu\text{rad}$,抖动误差 σ_j 分别取 $1\text{ }\mu\text{rad}$ 和 $5\text{ }\mu\text{rad}$,代表相对较小与相对较大的抖动误差。图2显示了不同抖动误差 σ_j 下,APD探测电流幅度 K 的PDF曲线与外失配比率曲线,左纵坐标为外失配比率,右纵坐标为概率密度函数。

根据式(9),APD2探测的电流幅度 K_2 是固定值,与偏移半径无关,因此其PDF表现为 δ 函数,如图2中黑色箭头所示。APD1探测的电流幅度 $K_1(r_z)$ 是半径偏移 r_z 的函数,图2中蓝色与紫色虚线分别为抖动误差取 $1\text{ }\mu\text{rad}$ 和 $5\text{ }\mu\text{rad}$ 时没有光束漂移影响下 $K_1(r_z)$ 的PDF曲线,图2中蓝

色与紫色实线分别为存在光束漂移影响下 $K_1(r_2)$ 的PDF曲线。为了方便分析不同抖动误差下，单指向误差与指向误差和光束漂移共同影响下对外失配的影响，使用平均电流幅度 K_1 值进行分析。在不同信号光束偏移影响下的平均 K_1 值计算如式(17)所示

$$\begin{aligned} \text{平均 } K_{1i}' &= \int_0^{+\infty} K_1(r) \rho_p(r) dr \\ \text{平均 } K_{1i} &= \int_0^{+\infty} K_1(r) \rho_{bp}(r) dr \end{aligned} \quad (17)$$

其中， K_{1i}' 为单指向误差影响下平均 K_1 值， K_{1i} 为指向误差与光束漂移共同作用下平均 K_1 值。

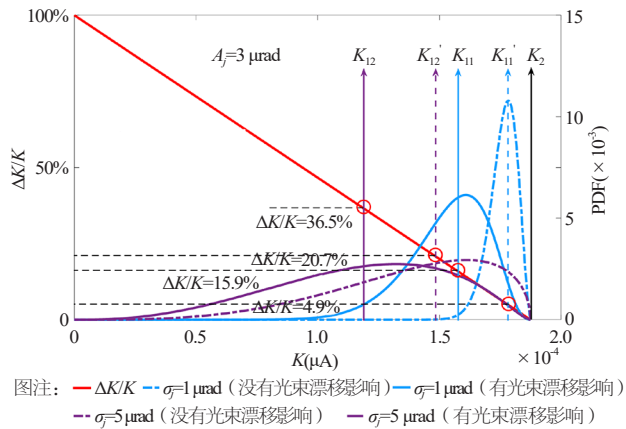


图2 固定视轴误差 A_j 为 $3 \mu\text{rad}$ 时不同抖动误差 σ_j 下，APD探测电流幅度的PDF曲线与外失配比率曲线

此时平均 K_1 值也表现为 δ 函数，图2中蓝色与紫色虚线箭头 K_{11}' 与 K_{12}' 分别为抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$ 时没有光束漂移影响下的平均 K_1 值 δ 函数，蓝色与紫色实线箭头 K_{11} 与 K_{12} 分别为存在光束漂移影响下的平均 K_1 值 δ 函数。根据式(10)，当没有指向误差或光束偏移的影响时，平均 K_1 值应该等于 K_2 ，此时外失配比率为0。当存在指向误差影响时，APD探测到的电流幅度有更大的可能减小，此时平均 K_1 值 δ 函数左移，根据 δ 函数性质可知，与外失配比率曲线的交点为此时的平均外失配比率。当抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$ 时，外失配比率分别增加到4.9%与20.7%。而光束漂移在指向误差的基础上进一步使得APD探测到的平均电流幅度减小，因此造成 δ 函数进一步左移并引入更大的外失配。当抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 时，在光束漂移的影响下， δ 函数由 K_{11}' 左移到 K_{11} ，外失配比例由4.9%增加到15.9%；当抖动误差取 $5 \mu\text{rad}$ 时，在光束漂移的影响下， δ 函数由 K_{12}' 左移到 K_{12} ，外失配比例由20.7%增加到36.5%。为了进一步说明指向误差与光束漂移如何引入外失配进而对系统性能造成影响，可计算不同信号光束偏移时的误码率。当抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 时，没有光束漂移影

响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-14.35与-5.65；当抖动误差取 $5 \mu\text{rad}$ 时，没有光束漂移影响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-3.38与-2.78。因此当抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 时，光束漂移会使得外失配比率从4.9%恶化至15.9%，BER恶化8.70 dB；当抖动误差取 $5 \mu\text{rad}$ 时，光束漂移会使得外失配比率从20.7%恶化至36.5%，BER恶化0.60 dB。

对内失配进行分析，此时外失配 ΔK 设置为0。将视轴误差 A_j 固定为 $3 \mu\text{rad}$ ，抖动误差 σ_j 分别取 $1 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$ 。图3显示了不同抖动误差 σ_j 下环路增益 β 的PDF曲线与内失配比率曲线，左纵坐标为内失配比率，右纵坐标为概率密度函数。根据式(11)，发射端环路增益 β_1 是固定值，因此其PDF表现为 δ 函数，如图3中黑色箭头 β_1 所示。而接收端环路增益 β_2 是半径偏移 r_2 的函数，图3中蓝色与紫色虚线分别为抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$ 时没有光束漂移影响时 $\beta_2(r_2)$ 的PDF曲线，图3中蓝色与紫色实线分别为存在光束漂移影响时 $\beta_2(r_2)$ 的PDF曲线。此处同样使用平均环路增益 β_2 值来分析不同半径偏移对内失配的影响，如式(18)所示

$$\begin{aligned} \text{平均 } \beta_{2i}' &= \int_0^{+\infty} \beta_2(r) \rho_p(r) dr \\ \text{平均 } \beta_{2i} &= \int_0^{+\infty} \beta_2(r) \rho_{bp}(r) dr \end{aligned} \quad (18)$$

其中， β_{2i}' 为单指向误差影响下的平均 β_2 值， β_{2i} 为指向误差与光束漂移共同作用下的平均 K_1 值。

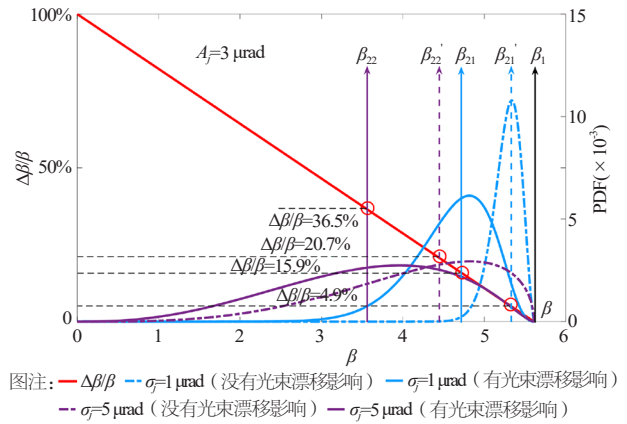


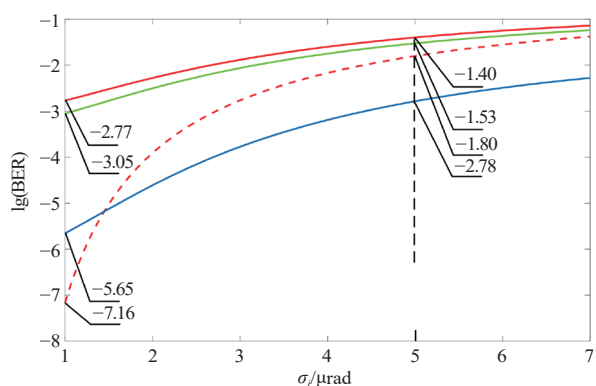
图3 固定视轴误差 A_j 为 $3 \mu\text{rad}$ 时不同抖动误差 σ_j 下，环路增益 β 的PDF曲线与内失配比率曲线

此时平均 β_2 值也表现为 δ 函数，图3中蓝色与紫色虚线箭头 β_{21}' 与 β_{22}' 分别为抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$ 时没有光束漂移影响时的平均 β_2 值 δ 函数，蓝色与紫色实线箭头 β_{21} 与 β_{22} 分别为存在光束漂移影响时平均 β_2 值 δ 函数。根据式(12)，当没有指向误差或光束漂移的影响时，平均 β_2 值应该等于 β_1 ，此时内失配比率为0。在指向误差影响下，当抖动误差取 $1 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$ 时，内失配比率分别会增加到

4.9%与20.7%。光束漂移会在指向误差基础上进一步引入内失配,当抖动误差取1 μrad 时,在光束漂移的影响下, δ 函数由 β_{21} 左移到 β_{21} ,内失配比例由4.9%增加到15.9%;当抖动误差取5 μrad 时,在光束漂移的影响下, δ 函数由 β_{22} 左移到 β_{22} ,内失配比例由20.7%增加到36.5%。

虽然光束漂移在指向误差基础上增加的外失配比率与内失配比率相同,但二者对系统误码率有不同的影响。计算误码率得到,当抖动误差取1 μrad 时,没有光束漂移影响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-7.90与-3.05;当抖动误差取5 μrad 时,没有光束漂移影响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-1.95与-1.53。因此当抖动误差取1 μrad 时,光束漂移会使得内失配比率从4.9%恶化至15.9%,BER恶化4.85 dB;当抖动误差取5 μrad 时,光束漂移会使得内失配比率从20.7%恶化至36.5%,BER恶化0.42 dB。

在实际系统中,外失配与内失配均会对系统造成影响,因此下面将综合分析外失配与内失配。图4显示了固定视轴误差 A_j 为3 μrad 时不同抖动误差 σ_j 下,不同失配情况与有无光束漂移影响时的误码率。分别是内外失配与没有光束漂移影响时、单外失配有光束漂移影响时、单内失配有光束漂移影响时与内外失配有光束漂移影响时的不同抖动误差下误码率变化情况。在最坏情况下指向误差与光束漂移会引入内外失配,对应图4中的红色实线,此时系统误码率最差。如果在外失配、内失配与光束漂移中选择一项进行优化,则可以得到另外3条误码率曲线。当仅优化外失配时,系统受到指向误差与光束漂移引入的内失配影响,误码率曲线从红色实线变为绿色实线;当仅优化内失配时,系统受到指向误差与光束漂移引入的外失配影响,误码率曲线从红色实线变为蓝色实线;当仅优化光束漂移时,系统受到指向误差引入的内外失配影响,误码率曲线从红色实线变为红色虚线。



图注: -- ΔK 和 $\Delta\beta$ (没有光束漂移影响) -- 仅 $\Delta\beta$ (有光束漂移影响)
— 仅 ΔK (有光束漂移影响) — ΔK 和 $\Delta\beta$ (有光束漂移影响)

图4 视轴误差 A_j 为3 μrad 时不同抖动误差 σ_j 下,不同失配情况与有无光束漂移影响时的误码率

当固定抖动误差为1 μrad 时,内外失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-2.77,单内失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-3.05,单外失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-5.65,内外失配与无光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-7.16。当固定抖动误差为1 μrad 时,优化光束漂移对系统性能影响更大,优化内失配效果次之,优化外失配对系统性能提升最少;当固定抖动误差为5 μrad 时,内外失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-1.40,单内失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-1.53,内外失配与无光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-1.80,单外失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-2.78。当固定抖动误差为5 μrad 时,优化内失配对系统性能影响更大,优化光束漂移效果次之,优化外失配对系统性能提升最少。

因此当抖动误差较小时,优化光束漂移对系统性能提升更大;当抖动误差较大时,优化内失配对系统性能提升更大;不论抖动误差较大或较小,优化内失配均比优化外失配对系统性能提升更大。

4.2 不同视轴误差下光束漂移影响

上文分析了不同抖动误差下光束漂移对系统性能的影响,下面将分析不同视轴误差下的光束漂移影响。首先对外失配进行分析,此时内失配 $\Delta\beta$ 设置为零。将抖动误差 σ_j 固定为3 μrad ,视轴误差 A_j 分别取1 μrad 和5 μrad ,代表相对较小与相对较大的视轴误差。图5显示了不同视轴误差下APD探测电流幅度 K 的PDF曲线与外失配比率曲线,左纵坐标为外失配比率,右纵坐标为概率密度函数。

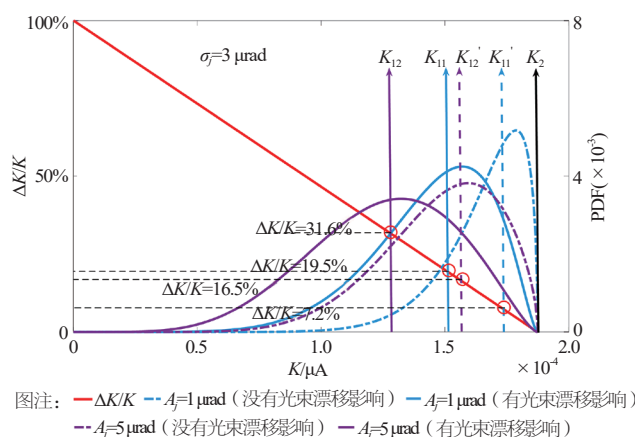


图5 固定抖动误差 σ_j 为3 μrad 时不同视轴误差 A_j 下,APD探测电流幅度 K 的PDF曲线与外失配比率曲线

当视轴误差取1 μrad 和5 μrad 时,外失配比率分别会增加到7.2%与16.5%。当视轴误差取1 μrad 时,在光束漂移的影响下, δ 函数由 K_{11} 左移到 K_{11} ,外失配比例由7.2%增加到19.5%;当视轴误差取5 μrad 时,在光束漂移的影响下,

δ 函数由 K_{12} 左移到 K_{12} , 外失配比例由16.5%增加到31.6%。为了进一步说明指向误差与光束漂移如何引入外失配进而对系统性能造成影响, 可计算不同信号光束偏移时的误码率。当视轴误差取1 μrad 时, 没有光束漂移影响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-5.95与-4.21; 当视轴误差取5 μrad 时, 没有光束漂移影响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-4.42与-3.28。因此当视轴误差取1 μrad 时, 光束漂移会使得外失配比率从7.2%恶化至19.5%, BER恶化1.74 dB; 当视轴误差取5 μrad 时, 光束漂移会使得外失配比率从16.5%恶化至31.6%, BER恶化1.14 dB。

对内失配进行分析, 此时外失配 ΔK 设置为0。将抖动误差 σ_j 固定为3 μrad , 视轴误差分别取1 μrad 和5 μrad 。图6显示了不同视轴误差 A_j 下, 环路增益 β 的PDF曲线与内失配比率曲线, 左纵坐标为内失配比率, 右纵坐标为概率密度函数。

在指向误差影响下, 当视轴误差取1 μrad 和5 μrad 时, 内失配比率分别会增加到7.2%与16.5%。当视轴误差取1 μrad 时, 在光束漂移的影响下, δ 函数由 β_{21} 左移到 β_{21} , 内失配比例由7.2%增加到19.5%; 当视轴误差取5 μrad 时, 在光束漂移的影响下, δ 函数由 β_{22} 左移到 β_{22} , 内失配比例由16.5%增加到31.6%。虽然光束漂移在指向误差基础上引入的外失配比率与内失配比率相同, 但二者对系统误码率有不同的影响。计算误码率得到, 当视轴误差取1 μrad 时, 没有光束漂移影响与存在漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-3.54与-2.34; 当视轴误差取5 μrad 时, 没有光束漂移影响与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 分别为-2.45与-1.74。因此当视轴误差取1 μrad 时, 光束漂移会使得内失配比率从7.2%增加到19.5%, BER恶化1.20 dB; 当视轴误差取5 μrad 时, 光束漂移会使得内失配比率从16.5%增加到31.6%, BER恶化0.71 dB。

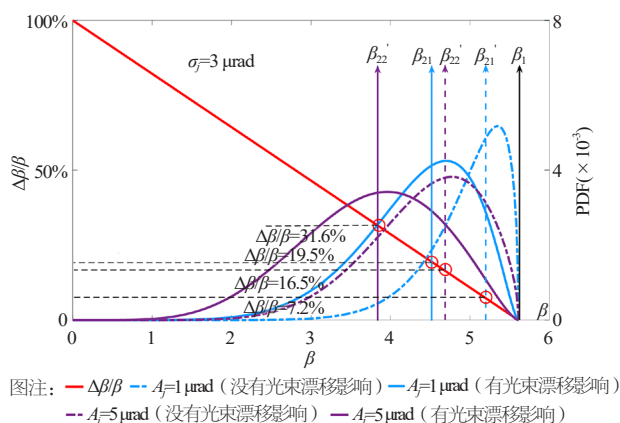


图6 固定抖动误差 σ_j 为3 μrad 时不同视轴误差 A_j 下, 环路增益 β 的PDF曲线与内失配比率曲线

下面将综合分析外失配与内失配, 图7显示了固定抖动误差 σ_j 为3 μrad 时不同视轴误差 A_j 下, 不同失配情况与有无光束漂移影响时的误码率。分别是内外失配与没有光束漂移影响时、单外失配有光束漂移影响时、单内失配有光束漂移影响时与内外失配有光束漂移影响时的不同视轴误差下误码率变化情况。

当固定视轴误差 A_j 为1 μrad 时, 内外失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-2.14, 单内失配与存在光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-2.34, 内外失配与无光束漂移影响时 $\lg(\text{BER})$ 为-3.26, 单外失配与存在光束漂移影响下 $\lg(\text{BER})$ 为-4.21。当视轴误差较小, 优化内失配对系统性能影响更大, 优化光束漂移效果次之, 优化外失配对系统性能提升最少。当视轴误差继续增大时, 不同于图4中曲线存在交叉的情况, 在图7中内外失配与无光束漂移影响时误码率曲线(红色虚线)与单外失配和光束漂移影响下误码率曲线(蓝色实线)没有交叉。说明固定抖动误差为3 μrad 的情况下, 当视轴误差较大时, 优化内失配比优化光束漂移对系统性能提升更大。

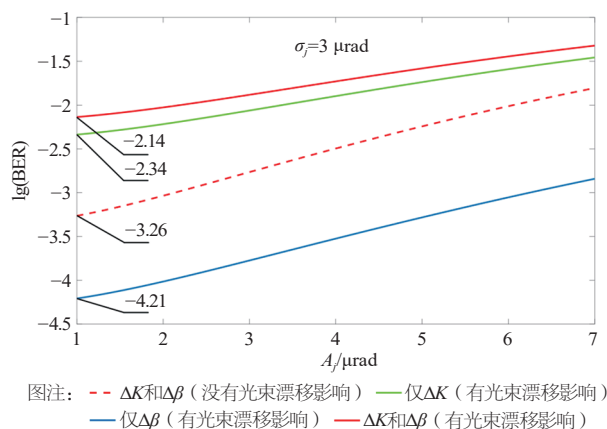


图7 抖动误差 σ_j 为3 μrad 时不同视轴误差 A_j 下, 不同失配情况与有无光束漂移影响时的误码率

当将抖动误差 σ_j 减少为1 μrad 时, 不同视轴误差 A_j 下, 不同失配情况与有无光束漂移影响时误码率如图8所示。从图8中可看出, 在视轴误差 A_j 较小时, 优化光束漂移对系统性能提升更大; 在视轴误差 A_j 较大时, 优化内失配对系统性能提升更大。

当优化光束漂移时, 指向误差引入的外失配与内失配会对系统性能造成影响。当优化内失配时, 指向误差引入的外失配与光束漂移引入的外失配对系统性能造成影响。对比优化光束漂移与内失配, 相同点在于指向误差引入的外失配, 不同点在于指向误差引入的内失配与光束漂移引入的外失配。根据式(6), 光束漂移方差大小

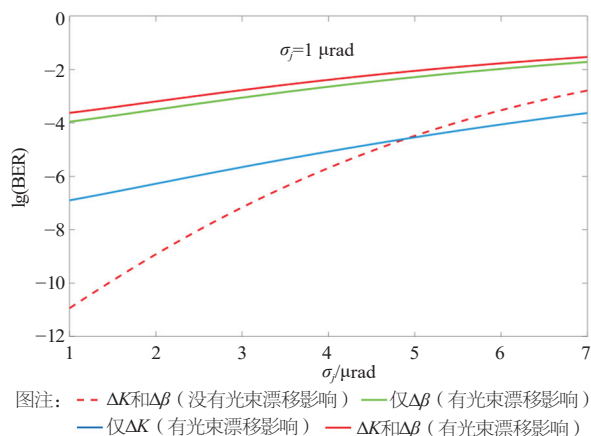


图8 抖动误差 σ_j 为1 μrad 时不同视轴误差 A_j 下，不同失配情况与有光束无漂移影响时的误码率

相对固定，根据式(4)，指向误差会随着抖动和视轴误差的增大而增大。在图7中，当抖动误差为3 μrad 时指向误差已经较大，指向误差会对系统引入较大的内失配，而大小相对固定的光束漂移引入的外失配比指向误差引入的内失配影响更小，因此在指向误差较大时优化内失配对系统性能提升更大。而在图4与图8中，当指向误差较小时，光束漂移引入的外失配比较小指向误差引入的内失配影响更大，因此在指向误差较小时优化光束漂移对系统性能提升更大。综上，当指向误差较小时，优化光束漂移对系统性能影响更大；当指向误差较大时，优化内失配对系统性能影响更大。

参考文献：

- [1] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化信息网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Air-space-ground integrated information network technology: Exploration and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [2] 徐益平. 天地一体化信息网络发展趋势与挑战[J]. 现代雷达, 2017, 39(7): 12-16.
XU Y P. Development trends and challenges of the integrated information network of world and earth[J]. Modern Radar, 2017, 39(7): 12-16.
- [3] 季新生, 梁浩, 扈红超. 天地一体化信息网络安全防护技术的新思考[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 24-35.
JI X S, LIANG H, HU H C. New thoughts on the security protection technology of the world-ground information network[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 24-35.
- [4] 姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
JIANG H L, FU Q, ZHAO Y W, et al. Development status and trend of spatial information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.
- [5] 于思源, 马晶, 谭立英. 自由空间激光通信技术发展趋势分析[J]. 光通信技术, 2004, (12): 47-50.
YU S Y, MA J, TAN L Y. Analysis on the development trend of free space laser communication technology[J]. Optical Communication Technology, 2004, (12): 47-50.
- [6] RULKOV N F, VORONTSOV M A, ILLING L. Chaotic free-space laser communication over a turbulent channel[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(27): 277905.
- [7] YANG F, CHENG J, TSIFTIS T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 713-725.
- [8] RODRIGUEZ-GOMEZ A, DIOS F, RUBIO J A, et al. Temporal statistics of the beam-wander contribution to scintillation in ground-to-satellite optical links: An analytical approach[J]. Applied Optics, 2005, 44(21): 4574-4581.
- [9] SMILI M, PERI Z, MILI D, et al. Influence of zero and non-zero boresight pointing errors on bit-error rate free-space optic transmission over Málaga atmospheric channel[J]. Optica Applicata, 2018, 48(2): 179-189.
- [10] SONG T Y, WANG Q, WU M W, et al. Impact of pointing errors on the error performance of intersatellite laser communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(14): 3082-3091.
- [11] HUANG Y P, ZENG A P, GAO Z H, et al. Beam wander of partially coherent array beams through non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Letters, 2015, 40(8): 1619-1622.
- [12] MUKHERJEE A, KAR S, JAIN V K. Analysis of beam wander effect in high turbulence for FSO communication link[J]. IET Communications, 2018, 12(20): 2533-2537.
- [13] GASTAUD GALLAGHER N H R. Multi-gigahertz encrypted communication using electro-optical chaos cryptography[D]. Georgia Institute of Technology, 2007.
- [14] LI M, HONG Y F, WANG S, et al. Radiation-induced mismatch effect on performances of space chaos laser communication systems[J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 5134-5137.
- [15] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. SPIE, 2005.
- [16] LI M, HONG Y F, SONG Y J, et al. Effect of controllable

parameter synchronization on the ensemble average bit error rate of space-to-ground downlink chaos laser communication system[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2954-2964.

- [17] SANDALIDIS H G, TSIFTISIS T A, KARAGIANNIDIS G K. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4440-4445.
- [18] DIOS F, RUBIO J A, RODRÍGUEZ A, et al. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink[J]. Applied Optics, 2004, 43(19): 3866-3873.
- [19] LI M, HONG Y F, ZENG C, et al. Investigation on the UAV-to-satellite optical communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 2128-2138.
- [20] KOUOMOU Y C, COLET P, LARGER L, et al. Mismatch-induced bit error rate in optical chaos communications using semiconductor lasers with electrooptical feedback[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(2): 156-163.

[作者简介]



李密（1980—），南京大学现代工程与应用科学学院副教授，江苏省大众创业万众创新研究会创始会员，江苏省“六大人才高峰”高层次人才，主要研究方向为超高速空间激光通信技术、空间混沌硬件安全技术。



陈强（1971—），南京大学现代工程与应用科学学院教授，主要研究方向为激光通信技术、光纤传感检测技术。



曾丞（1996—），南京大学现代工程与应用科学学院硕士生，主要研究方向为空间激光通信技术和空间混沌激光通信技术。



汪学（1998—），南京大学现代工程与应用科学学院硕士生，主要研究方向为空间激光通信和空间混沌安全通信。



王祎思（1998—），南京大学现代工程与应用科学学院硕士生，主要研究方向为相干激光通信技术、空间混沌硬件安全技术。



陈向飞（1969—），南京大学现代工程与应用科学学院教授，主要研究方向为光通信、集成微波光子学、精准光子集成。