

# 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响

刘宏展<sup>1,2</sup> 纪越峰<sup>2</sup> 刘立人<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876

<sup>2</sup> 华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006

<sup>3</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800

**摘要** 以空间链路方程为基础, 详细推导了具有不同像差时的星间相干光通信接收系统信噪比表达式。以通信距离为 60000 km、速率为 2 Gb/s 的 2PSK 零差同步轨道接收系统为例, 通过数值仿真, 全面比较了接收天线的倾斜、离焦、彗差和像散等像差对接收系统误码率( $\epsilon_{\text{BER}}$ )的影响。结果表明, 不同像差单独作用时, 倾斜像差的影响最大, 象散的影响最小; 不同像差相互作用时, 它们中的某些能部分实现相互校正, 从而降低误码率。以  $\epsilon_{\text{BER}} \leq 10^{-6}$  为比较标准, 当彗差  $W_{31}/\lambda \leq 1.00$  时, 调整倾斜像差能实现它们之间的部分校正; 当像散  $W_{22}/\lambda \leq 0.53$  时, 调整离焦能对像散进行部分校正。因此, 在设计接收系统时, 接收天线的像差所产生的影响不容忽视。这将为设计星间相干通信接收系统提供必要的理论依据。

**关键词** 光通信; 星间相干光通信; 像差; 误码率

中图分类号 TN 929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0106002

## Effect of Aberration on Performance of the Bit Error Rate in an Inter-Satellite Coherent Optical Communication Receiving System

Liu Hongzhan<sup>1,2</sup> Ji Yuefeng<sup>2</sup> Liu Liren<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Photonic Information Technology of Guangdong Province, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>3</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** Based on the space optical communication link equation, it is given in detail that the signal-to-noise ratio (SNR) equations for the inter-satellite coherent optical communication receiving system (ISCOCRS) with different aberrations. With communication distance for 60000 km, transmission rate of 2 Gb/s binary phase shift keying (2PSK) homodyne geosynchronous orbit receiving system as an example, through numerical simulation, the effect of the tilt, defocusing, coma and astigmatism aberrations on the bit error ratio (BER) of the ISCOCRS is compared systematically. The simulation results show that effect of the tilt aberration is the BER is more seriously than the astigmatism when the different aberrations influence the ISCOCRS individually, at the same time, the different aberrations can be partly corrected by another when they effect mutually, Which leads to the lower BER. With the BER more than  $10^{-6}$  as standard, through adjusting the tilt, the coma can be partly corrected when the normalized coma is more than 1.00, and adjusting the defocusing can partly correct the astigmatism when the normalized astigmatism is more than 0.53. Therefore, the aberrations' influence should be overlooked in the process of

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-08-17

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z256, 2009AA01Z253, 2009AA01A345)、中国博士后基金(20100470257)和中国科学院空间激光通信及检验技术重点开放实验室(KFKT2009-03)资助课题。

作者简介: 刘宏展(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间光通信、光学精密检测及传感等方面的研究。

E-mail: lhzhzhan@yahoo.com.cn

designing the ISCOCRS. These results provide some theoretic basis for the ISCOCRS.

**Key words** optical communications; inter-satellite coherent optical communication; aberration; bit error ratio (BER)

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 060.1660; 080.1010

## 1 引 言

近年来星间相干光通信已成为空间光通信领域的研究热点之一<sup>[1~4]</sup>,德国的 TERRA-SAR-X 卫星与相距 5000 km 的美国 NFIRES 卫星间在 2008 年就实现了 5.65 Gb/s 的相干光通信<sup>[5]</sup>,这更让人看到它的生命力。通信系统的性能通常用有效性与可靠性(即传输速率和误码率)来衡量,发生相干光通信的两颗卫星之间的距离一般超过几万公里,要实现高速率、低误码率的通信,在发射功率、天线尺寸一定的条件下,要求两个通信终端的光学天线之间必须能保持误差不超过几微弧度的动态对准;不仅如此,像差将成为制约接收系统性能的重要因素<sup>[6,7]</sup>。谭立英等<sup>[6]</sup>系统研究了信号光波前局部误差对星间光通信捕获精度的影响,并指出为了保持系统性能,光学元件的加工精度应高于  $0.2\lambda$ ;向劲松等<sup>[7]</sup>系统研究了各种像差对星间相干光通信系统外差效率的影响,并给出了相应的改善措施,为实现高效混频提供了参考。把实际的通信链路方程考虑进去,而综合探讨像差对星间相干光通信接收系统可靠性(误码率)的研究还未见报道。因此,本文将空间通信链路方程为出发点,在详细推导星间相干激光通信接收系统信噪比的基础上,系统研究接收天线各种像差对接收系统误码性能的影响,为设计星间相干光通信接收系统提供必要的理论依据。

## 2 空间链路方程和系统信噪比

要讨论星间激光通信系统的通信性能,必须归结到空间链路方程,它反映了各种参数对系统的具体作用和影响。按照文献[8],自由空间激光通信的链路方程为

$$P_R(\theta_T, \theta_R, \theta_P) = P_T \eta_T \eta_R G_T G_R L_Z L_T(\theta_T) L_R(\theta_R) \cos^2 \theta_P, \quad (1)$$

式中  $P_T$  是信号光束的发射功率; $\eta_T, \eta_R$  分别是发射、接收天线效率; $G_T, G_R$  分别为发射、接收天线增益; $L_Z = (\lambda/4\pi z)^2$  是光束经距离为  $z$  的自由空间传输时的损耗; $L_T(\theta_T)$  为发射天线的对准损耗; $L_R(\theta_R)$  为接收天线的对准混频损耗; $\theta_T, \theta_R$  分别为发射、接收天线的对准误差角; $\theta_P$  是本振光束的线偏振角; $\cos^2 \theta_P$  为相应的偏振损耗; $\lambda$  为光束波长; $P_R(\theta_T, \theta_R, \theta_P)$  表示经接收天线进入探测器的接收

功率。

在星间激光通信系统中<sup>[9]</sup>,发射天线发射的信号光束通常为高斯光束,其发射天线的增益  $G_T = (2\pi W/\lambda)^2$ ,这里的  $W$  是指信号高斯光束经天线往外发射时的均方宽度,与之对应的发射对准损耗  $L_T(\theta_T) = \exp(-G_T \theta_T^2)$ 。

接收天线的增益  $G_R = (2\pi r_0/\lambda)^2$ , $r_0$  是接收天线的孔径半径,则混频损耗为<sup>[10]</sup>

$$L_R(q_0) = \left| \frac{1}{A} \int_{A_d} \phi_L(q) \phi_R^*(q - q_0) dq \right|^2, \quad (2)$$

式中  $\phi_R(q)$  是信号光经接收天线在探测器上的光电场表达式, $\phi_L(q)$  是本振光在探测器上的光电场表达式, $A_d$  是探测器面积, $A$  是归一化因子, $q_0$  是信号光偏离探测器中心的距离, $f$  是接收天线的焦距,这里利用了  $\theta_R \approx q_0/f$ 。

(1) 式表征了入射到探测器上的天线接收功率  $P_R(\theta_T, \theta_R, \theta_P)$  与链路的各个参数之间的定量关系,探测器的电信号功率输出为<sup>[8]</sup>

$$S(\theta_T, \theta_R, \theta_P) = 4R^2 P_R(\theta_T, \theta_R, \theta_P) P_{LO}, \quad (3)$$

考虑到相干光通信的主要噪声是闪烁噪声:

$$N = 2q_e R P_{LO} B_W. \quad (4)$$

则系统信噪比为

$$R_{SN}(\theta_T, \theta_R, \theta_P) = \frac{S(\theta_T, \theta_R, \theta_P)}{N} = \frac{2RP_T \eta_T \eta_R G_T G_R L_Z L_T(\theta_T) L_R(\theta_R) \cos^2 \theta_P}{q_e B_W}, \quad (5)$$

式中  $R = q_e \eta/h\nu$  表示探测器的响应率, $q_e$  是电子的电荷, $\eta$  是量子效率, $\nu$  是光频率, $h$  是普朗克常量, $P_{LO}$  是本振光的功率, $B_W$  是系统的有效带宽。

由(5)式可见,对于某一具体星间相干光通信系统而言,其信噪比是  $\theta_T, \theta_R, \theta_P$  的函数。考虑到实际的系统都采取了相关措施保证信号光与本振光偏振态一致,通常令  $\theta_P = 0$ ;而  $\theta_T, \theta_R$  是由系统的对准误差所决定的,它们对系统性能的影响在文献[8,9]中已有详细的讨论;特别地,当  $\theta_R = 0$  时,(2)式变为

$$L_R(0) = \left| \frac{1}{A} \int_{A_d} \phi_L(q) \phi_R^*(q) dq \right|^2 = \eta_{\infty}, \quad (6)$$

此时,(6)式即是常规的混频效率表达式,如果把系统的像差对接收信号光束  $\phi_R(q)$  的影响考虑进去<sup>[7]</sup>,则(6)式表征了具有像差时的混频效率。综合

(5),(6)式,可以看出,像差必将对系统信噪比产生影响,进而影响到系统的可靠性。接下来将就此作更深入的探讨,并运用数值计算的方法进行具体分析。

### 3 像差与通信可靠性的理论分析

为了全面系统地了解像差对星间相干光通信接收系统可靠性的影响,以及它们相互补偿校正的机制,这里不讨论跟瞄误差角及偏振态的影响,即令 $\theta_T, \theta_R, \theta_P$ 都取0,同时考虑(6)式,则(5)式变成

$$R_{SN} = \frac{S(0,0,0)}{N} = \frac{2RP_T \eta_T \eta_R G_T G_R L_Z \eta_{co}}{q_e B_w}. \quad (7)$$

由(7)式可知,就某一具体的系统而言,接收天线尺寸、通信距离和带宽是设定好的,故信噪比 $R_{SN}$ 将是 $\eta_{co}$ 的函数,对于不同的像差,将有不同的 $\eta_{co}$ 表达式。根据文献[11],入射到接收系统的信号光束经接收光学天线接收时,由像差所引起的波前畸变可表示为

$$\begin{aligned} W(\rho, \theta) = & W_{1x} \rho \cos \theta + W_{1y} \rho \cos \theta + W_{20} \rho^2 + \\ & W_{40} \rho^4 + W_{131} H \rho^3 \cos \theta + W_{222} H^2 \rho^2 \cos^2 \theta + \\ & W_{222} H^2 \rho^2 + W_{311} H^3 \rho \cos \theta, \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $W(\rho, \theta)$ 为接收天线出瞳位置处实际信号光束波前与参考球面波前的光程差, $\rho = r/r_0$ 为接收天线归一化孔径坐标向量, $\theta$ 是像点在像平面内相对于子午平面的旋转角, $H$ 为像点到光轴的距离,(8)式等号右边的第1、2项分别表示接收天线 $X, Y$ 方向的倾斜像差,第3~8项分别表示接收天线离焦、球差、彗差、像散、场曲和畸变像差。

考虑到实际的星间相干光通信系统其发射、接收天线都进行过光学优化设计,尤其对球差进行过优化,使其已最小化,但是系统处于高速运动状态,这致使接收的信号光束极易发生倾斜且偏离光轴,从而使得接收系统性能容易受到倾斜、离焦、彗差、像散、场曲和畸变的影响。这将导致系统信噪比下降,误码率急剧上升,令通信性能严重劣变。考虑到轴外畸变的影响与倾斜像差类似,而场曲的影响与离焦类似<sup>[7]</sup>,因此,将重点讨论倾斜、离焦、彗差及像散这4种像差对接收系统可靠性,即误码率所造成的影响。

根据文献[8],发射的信号光束为高斯光束,到达接收天线前端面时,信号光束可用平面光波近似,且本振光为高斯光束,则具有倾斜、离焦、彗差及像散像差时接收系统的混频效率 $\eta_{co}$ 分别用 $\eta_{w_{1x}}, \eta_{w_{20}}, \eta_{w_{31}}, \eta_{w_{22}}$ 表示<sup>[7]</sup>:

$\eta_{w_{1x}}, \eta_{w_{22}}$ 表示<sup>[7]</sup>:

$$\eta_{w_{1x}} = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) J_0(2\pi\rho W_{1x}/\lambda) \rho d\rho \right|^2, \quad (9)$$

$$\eta_{w_{20}} = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) \exp(i2\pi\rho^2 W_{20}/\lambda) \rho d\rho \right|^2, \quad (10)$$

$$\eta_{w_{31}} = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) J_0(2\pi\rho^3 W_{31}/\lambda) \rho d\rho \right|^2, \quad (11)$$

$$\eta_{w_{22}} = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) \exp(i\pi\rho^2 W_{22}/\lambda) J_0(\pi\rho^2 W_{22}/\lambda) \rho d\rho \right|^2, \quad (12)$$

式中 $\beta = 1.121$ , $J_0$ 为零阶贝塞尔函数, $W_{31} = W_{131} H, W_{22} = W_{222} H^2$ 。把(9)~(12)式分别代入(7)式,则可得到不同像差时接收系统信噪比表达式,而接收系统传输数据的可靠性(误码率)是以信噪比为自变量的函数。具体而言,采用的调制、解调方式不同,则求解误码率的表达式也将不同。空间相干激光通信中通常考虑的是相位调制、零差或外差解调,这里以2PSK零差接收为例分析像差对接收系统误码率的影响,此时瞬时误码率与信噪比的关系为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon_{BER} = & \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{R_{SN}}) = \\ & \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{2RP_T \eta_T \eta_R G_T G_R L_Z \eta_{co}}{q_e B_w}}\right), \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\operatorname{erfc}(x)$ 是补误差函数。联合(9),(10)式,把 $\eta_{co}$ 分别用 $\eta_{w_{1x}}, \eta_{w_{20}}, \eta_{w_{31}}, \eta_{w_{22}}$ 替换,可以得出对应像差所导致的误码率情况,接下来将进行具体分析。

### 4 不同像差导致接收误码率的数值仿真与分析

考虑到高灵敏度的激光相干通信更适用于远距离的通信,这里以GEO轨道为例,综合考虑文献[8,12]的参数,以传输速率为2 Gb/s的2PSK零差系统为例,选定的参数如表1所示。对信号光束与本振光束的要求按照文献[7]执行。

为了更清晰地说明像差对接收系统可靠性的影响,分两步进行讨论,首先探讨接收系统各种像差各自所产生的影响,然后再探讨它们相互是否具有校正补偿功能。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| Parameters      | Values |
|-----------------|--------|
| $P_T/mW$        | 1000   |
| $z/km$          | 60000  |
| $\lambda/\mu m$ | 1.064  |
| $r_0/mm$        | 90     |
| $W/mm$          | 13.55  |
| $\eta$          | 0.8    |
| $\eta_T$        | 0.8    |
| $\eta_R$        | 0.8    |
| $B/GHz$         | 1      |

#### 4.1 不同像差单独作用时

先来考查倾斜、离焦、彗差及像散这 4 种像差对系统可靠性的影响。把表 1 的数据代入(13)式,并对倾斜、离焦、彗差及像散的像差进行归一化处理,即令  $W_{1x}, W_{20}, W_{31}, W_{22}$  分别除以  $\lambda$ , 以此作为自变

表 2 不同像差对接收系统误码率影响的比较

Table 2 Comparison of different aberrations influence on the  $\epsilon_{BER}$  of the receiving system

| Aberration           | Normalized aberration |             |             |             |             |             |             |      |
|----------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
|                      | $\epsilon_{BER}$      | 0.00        | 0.08        | 0.16        | 0.24        | 0.32        | 0.40        | 0.48 |
| Tilt $W_{1x}$        | $10^{-8}$             | $10^{-7.6}$ | $10^{-6.6}$ | $10^{-5.3}$ | $10^{-3.9}$ | $10^{-2.6}$ | $10^{-1.6}$ |      |
| Defocus $W_{20}$     | $10^{-8}$             | $10^{-7.8}$ | $10^{-7.4}$ | $10^{-6.8}$ | $10^{-6.0}$ | $10^{-5.1}$ | $10^{-4.2}$ |      |
| Coma $W_{31}$        | $10^{-8}$             | $10^{-7.8}$ | $10^{-7.4}$ | $10^{-6.8}$ | $10^{-6.0}$ | $10^{-5.3}$ | $10^{-4.5}$ |      |
| Astigmatism $W_{22}$ | $10^{-8}$             | $10^{-7.6}$ | $10^{-7.6}$ | $10^{-7.2}$ | $10^{-6.7}$ | $10^{-6.1}$ | $10^{-5.5}$ |      |

图 1 横坐标表示归一化的像差系数,纵坐标是取对数后的误码率。从图看到,对于星间相干光通信接收系统其可靠性容易受各种像差的影响。从图 1 两坐标轴的起点和表 2 第 1 列数据可以看到,在表 1 设定的参数下,在没有像差的影响的情况下,系统最小误码率接近  $10^{-8}$ ; 当有像差时,从图中 4 条曲线并比较表格第 2~5 行的数据,可以看到,接收系统的误码率随着像差的增加而递增,其中倾斜像差对接收系统误码率的影响最大,离焦和彗差相当,而像散的影响最小。若以  $\epsilon_{BER} \leq 10^{-6}$  为标准,系统能承受的最大倾斜像差  $W_{1x}$  仅为  $0.2\lambda$ , 最大离焦  $W_{20}$  及彗差  $W_{31}$  大约为  $0.32\lambda$ , 最大像散  $W_{22}$  不超过  $0.41\lambda$ 。可能的原因是: 系统一旦有倾斜像差,信号光束将完全偏离焦点,它与本振光束所形成的有效

量,依次把(9)~(12)式代入(13)式进行运算,并对所得误码率进行以 10 为底的对数变换,得到图 1 和表 2 所示的像差与误码率关系。

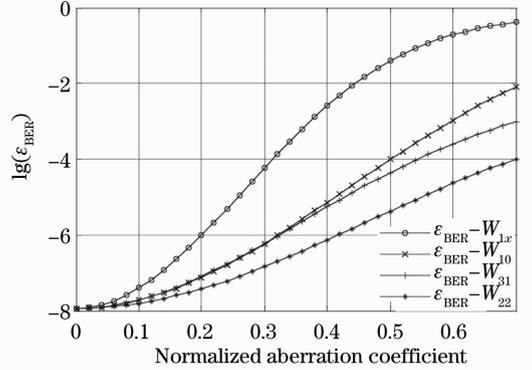


图 1 倾斜、离焦、彗差和像散对接收系统误码率的影响  
Fig. 1 Influence of tilt, defocus, coma and stigmatism on the bit error ratio of the receiving system

混频区域锐减,从而混频效率急降,使误码率快速攀升。离焦像差将使信号光束的聚焦光斑沿光轴在焦点前后变动,从而改变焦点处的光斑质量,影响它与本振光斑在焦点处的混频效果,使误码率上升;与倾斜像差导致的混频面积减少相比,这种信号光束聚焦特性的劣变是温和的,所以离焦像差对系统可靠性的影响比倾斜像差小。另外,考虑到接收光学系统已经进行过高阶像差的优化设计,且采取了抗扰动措施,所以彗差与像散的影响将更小,这也从侧面说明优化设计后的系统无需考虑更高阶像差的影响。

#### 4.2 像差间的相互校正

根据文献[7],倾斜像差与彗差之间、离焦与像散之间具有部分校正效应,接下来将进行比较分析。此时把(11)式改写成(14)式,而(12)式改写成(15)式:

$$\eta_{w_{31}} = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) J_0 [2\pi(\rho^3 W_{31} + W_{1x} \rho) / \lambda] \rho d\rho \right|^2, \quad (14)$$

$$\eta_{w_{22}} = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) \exp[i2\pi\rho^2(W_{22}/2 + W_{20}) / \lambda] J_0(\pi\rho^2 W_{22} / \lambda) \rho d\rho \right|^2. \quad (15)$$

把(14),(15)式分别代入(13)式,并采用归一化像差系数,令  $W_{31}/\lambda$  和  $W_{22}/\lambda$  分别取:0.00,0.25,0.50,0.75,1.00,得到图 2,3 和表 3,4 所示结果。

表 3 倾斜像差校正彗差提升接收系统误码性能的比较

Table 3 Comparison of the improving performance of the receiving system's  $\epsilon_{BER}$  by using the tilt to correct the coma

|                                  |      | Normalized tilt $-W_{1x}/\lambda$ |             |             |             |             |             |             |
|----------------------------------|------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                  |      | 0.00                              | 0.08        | 0.16        | 0.24        | 0.32        | 0.40        | 0.48        |
| Normalized coma $W_{31}/\lambda$ | 0.00 | $10^{-8}$                         | $10^{-7.6}$ | $10^{-6.6}$ | $10^{-5.3}$ | $10^{-3.9}$ | $10^{-2.6}$ | $10^{-1.6}$ |
|                                  | 0.25 | $10^{-6.7}$                       | $10^{-7.5}$ | $10^{-7.7}$ | $10^{-7.3}$ | $10^{-6.3}$ | $10^{-4.9}$ | $10^{-3.5}$ |
|                                  | 0.50 | $10^{-4.4}$                       | $10^{-5.5}$ | $10^{-6.4}$ | $10^{-7.0}$ | $10^{-7.1}$ | $10^{-6.6}$ | $10^{-5.6}$ |
|                                  | 0.75 | $10^{-2.8}$                       | $10^{-3.5}$ | $10^{-4.4}$ | $10^{-5.2}$ | $10^{-5.9}$ | $10^{-6.2}$ | $10^{-6.2}$ |
|                                  | 1.00 | $10^{-2.2}$                       | $10^{-2.6}$ | $10^{-3.1}$ | $10^{-3.7}$ | $10^{-4.3}$ | $10^{-4.8}$ | $10^{-5.1}$ |

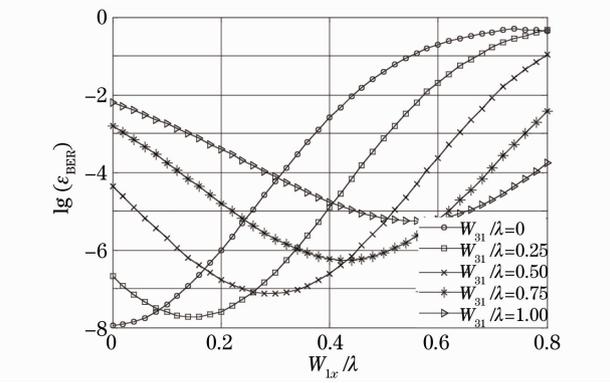


图 2 倾斜像差对彗差的校正作用对系统误码率的改善  
Fig. 2 Improving performance of  $\epsilon_{BER}$  through adjusting the tilt when the receiving system with the coma

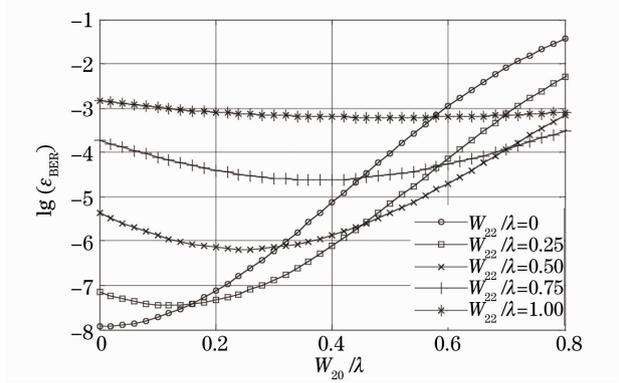


图 3 离焦像差对像散的校正作用对系统误码率的改善  
Fig. 3 Improving performance of  $\epsilon_{BER}$  through adjusting the defocus when the receiving system with the astigmatism

表 4 离焦像差校正像散提升接收系统误码性能的比较

Table 4 Comparison of the improving performance of the receiving system's  $\epsilon_{BER}$  by using the defocus to correct the astigmatism

|   |      | Normalized defocal $-W_{20}/\lambda$ |             |             |             |             |             |             |
|---|------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   |      | 0.00                                 | 0.08        | 0.16        | 0.24        | 0.32        | 0.40        | 0.48        |
| Normalized astigmatism $W_{22}/\lambda$ | 0.00 | $10^{-8}$                            | $10^{-7.8}$ | $10^{-7.4}$ | $10^{-6.8}$ | $10^{-6.0}$ | $10^{-5.1}$ | $10^{-4.2}$ |
|   | 0.25 | $10^{-7.2}$                          | $10^{-7.4}$ | $10^{-7.4}$ | $10^{-7.1}$ | $10^{-6.8}$ | $10^{-6.1}$ | $10^{-5.4}$ |
|   | 0.50 | $10^{-5.4}$                          | $10^{-5.8}$ | $10^{-6.1}$ | $10^{-6.2}$ | $10^{-6.1}$ | $10^{-5.9}$ | $10^{-5.5}$ |
|   | 0.75 | $10^{-3.7}$                          | $10^{-4.0}$ | $10^{-4.3}$ | $10^{-4.5}$ | $10^{-4.6}$ | $10^{-4.6}$ | $10^{-4.5}$ |
|   | 1.00 | $10^{-2.8}$                          | $10^{-3.0}$ | $10^{-3.1}$ | $10^{-3.1}$ | $10^{-3.2}$ | $10^{-3.2}$ | $10^{-3.2}$ |

图 2 表示倾斜像差与彗差之间的校正效果。以  $\epsilon_{BER} \leq 10^{-6}$  为标准,当倾斜像差  $W_{1x}/\lambda = 0$ ,从纵坐标轴上看,彗差  $W_{31}/\lambda = 0.50$  时,系统的误码率接近  $10^{-4}$ ,已超出标准 2 个数量级;当  $W_{31}/\lambda = 1.00$  时,误码率更是接近  $10^{-2}$ 。所以,若对彗差不进行校正,随着其数值的增大,误码率呈指数增长。但是,从图 2 也可看到,对于归一化的彗差  $W_{31}/\lambda$ ,可以通过调整归一化的倾斜像差  $W_{1x}/\lambda$  来部分校正,从而降低系统误码率,提升系统可靠性。譬如,同样是  $W_{31}/\lambda = 0.50$ ,但只要调整  $W_{1x}$ ,使  $W_{1x}/\lambda$  大致在  $-0.34 \sim$

$-0.24$  之间,则可以维持误码率  $\epsilon_{BER} \leq 10^{-6}$ 。不仅如此,从图 2 来看,即便  $W_{31}/\lambda = 1.00$ ,只要  $W_{1x}/\lambda$  大致在  $-0.44 \sim -0.66$  之间,误码率依然可以小于等于  $10^{-6}$ ,而此时若不进行校正,误码率已接近  $10^{-2}$ 。因此,当  $W_{31}/\lambda \leq 1.00$  时,为了保证系统误码率  $\epsilon_{BER} \leq 10^{-6}$ ,通过调整  $W_{1x}$ ,倾斜像差与彗差之间能够实现部分相互校正。

表 3 给出了通过调整倾斜来校正彗差而提升系统误码性能的效果。观察第 4 ~ 7 行,单独看每行时,发现随着归一化倾斜像差系数  $-W_{1x}/\lambda$  绝对值的递

增,误码率会经历变小、稳定、再变大的过程,这正是倾斜对彗差校正的体现,且对于不同取值的彗差,有相应的最佳倾斜调整参数,譬如当  $W_{31}/\lambda = 0.25$  时,令  $-W_{1x}/\lambda = 0.16$ ,系统误码率由补偿前的  $10^{-6.7}$  降低至最小值  $10^{-7.7}$ ,系统误码性能提升一个数量级;而比较第 4、5、6、7 行的数据,可以看到,随着彗差的增大,倾斜对其校正效果越来越弱。

回顾(8)与(14)式,可以发现,彗差  $W_{31}\rho^3 \cos \theta$  (其中  $W_{31} = W_{131}H$ ) 与  $x$  方向性的倾斜  $W_{1x}\rho \cos \theta$  具有相似性。对于相同的  $\theta$ ,若令  $\rho$  取 1,则彗差由  $W_{31}$  决定,而倾斜由  $W_{1x}$  决定,因此,只要两者取值相反,便能相互抵消,从而提高混频效率,降低误码率。对于  $W_{1y}\rho \cos \theta$  有相同的结论。

图 3 和表 4 表示了离焦与像散的相互校正作用。其变化趋势与图 2 相似,从图 3 看到,当  $W_{22}/\lambda \geq 0.75$  后,不管离焦像差  $W_{20}$  如何变化,系统的误码率不可能满足  $\epsilon_{\text{BER}} \leq 10^{-6}$ ,与之相比,即便是彗差  $W_{31}/\lambda = 1.00$ ,通过调整  $W_{1x}$ ,依然可以实现误码率  $\epsilon_{\text{BER}} \leq 10^{-6}$  的目标。以误码率  $\epsilon_{\text{BER}} \leq 10^{-6}$  为标准,经计算,此时的  $W_{22}/\lambda = 0.53$ 。因此,只有当  $W_{22}/\lambda \leq 0.53$  时,才能通过调整  $W_{20}$  对  $W_{22}$  进行部分校正。表 4 给出了离焦对像散校正效果的定量数据,观察第 4~7 行,其校正效果与表 3 的趋势相同,将各对应数据进行比较发现,与倾斜像差对彗差的校正效果相比,离焦与像散的相互校正效果稍逊一筹。这是由于轴外的物点成像时,通过光学天线系统后的光束所对应的波面不是球面波,它在子午面和弧矢面的曲率不同,所以子午像点和弧矢像点不会重合,从而产生像散,因此通过调整离焦量,可以改善子午面或者弧矢面内的成像质量,达到部分校正像散的效果。相比之下,倾斜与彗差具有相似的表达式,其校正效果更佳。

## 5 结 论

像差将影响星间相干光通信接收系统的可靠性,使误码率上升。从空间链路方程出发,综合考虑各种像差的影响,详细推导出系统信噪比表达式。以传输速率为 2 Gb/s 的 2PSK 零差同步轨道接收系统为例,在给定基本参数的条件下,具体分析了接收天线的倾斜、离焦、彗差及像散 4 种像差对系统可靠性的影响。像差经归一化处理后,通过数值仿真发现:系统误码率受倾斜像差的影响最大,而受像散的影响最小;以误码率  $\epsilon_{\text{BER}} \leq 10^{-6}$  为标准,当彗差  $W_{31}/\lambda \leq$

1.00 时,通过调整倾斜像差  $W_{1x}$ ,它们之间能实现部分相互校正;相比之下,离焦与像散的相互校正效果稍逊一筹,只有当像散  $W_{22}/\lambda \leq 0.53$  时,才能通过调整离焦  $W_{20}$  对像散  $W_{22}$  进行部分校正。这将为设计星间激光相干通信接收系统提供必要的理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 649~654  
佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用 [J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 649~654
- 2 Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, **34**(8): 39~42  
刘宏展,孙建锋,刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析 [J]. *光通信技术*, 2010, **34**(8): 39~42
- 3 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Optical phase locked loops in inter-satellites coherent optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(4): 25~33  
许楠,刘立人,刘德安等. 星间相干光通信中的光学锁相环 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(4): 25~33
- 4 Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 347~351  
许楠,刘立人,万玲玉等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 347~351
- 5 S. Buckreuss, R. Werninghaus, W. Pitz. The German satellite mission TerraSAR-X [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, **24**(11): 4~9
- 6 Liying Tan, Yuqiang Yang, Jing Ma *et al.*. Pointing and tracking errors due to localized deformation in inter-satellite laser communication links [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13372~13380
- 7 Xiang Jingsong, Pan Lechun. Heterodyne efficiency and the effects of aberration for space coherent optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(11): 53~57  
向劲松,潘乐春. 空间相干光通信外差效率及天线像差的影响 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(11): 53~57
- 8 S. Arnon, S. R. Rotman, N. S. Kopeika. Performance limitations of a free-space optical communication satellite network owing to vibrations: heterodyne detection [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6366~6374
- 9 C. Chen, C. S. Gardner. Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(3): 252~260
- 10 R. M. Gagliardi, S. Karp. *Optical Communications* [M]. New York: Wiley, 1995. 164~165
- 11 R. E. Wagner, W. J. Tomlinson. Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2671~2688
- 12 Wang Zhaohui, Zhao Changzheng, Chen Wenxin *et al.*. Effect of vibration on intersatellite coherent laser communication [J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(3): 336~340  
王朝晖,赵长政,陈文新等. 振动对星间相干激光通信的影响 [J]. *应用光学*, 2007, **28**(3): 336~340