

文章编号 1004-924X(2014)05-1204-08

星地相干激光通信中的自适应光学 系统边界参数设计

黄健^{1*}, 张鹏¹, 邓科¹, 蒋大钢¹, 么周石²

(1. 电子科技大学 航空航天学院, 四川 成都 610504; 2. 中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710000)

摘要:分析了星地相干激光二进制相移键控(BPSK)通信系统中自适应校正波前残差与相干效率的关系;讨论了自适应校正下相干效率和误码率的动态特征;然后,研究了大气闪烁对相干效率和通信误码率的影响。在假设接收强度均匀分布的前提下建立了波前残差均方根值与相干效率的理论关系,采用频率直方图方法仿真了相干效率以及相应的误码率的概率分布函数,计算了不同校正残差和闪烁条件下的通信平均误码率。结果表明:波前残差大于1 rad时,相干效率主要受波前残差影响,自适应校正性能达到衍射极限时才能获得 10^{-8} 的误码率,但此时大气闪烁可能会使误码率增大两个数量级。

关键词:相干激光通信;大气湍流;自适应光学系统;波前误差;大气闪烁;误码率

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1204

Boundary parameters of adaptive optical system in satellite to ground coherent laser communication system

HUANG Jian^{1*}, ZHANG Peng¹, DENG Ke¹, JIANG Da-gang¹, YAO Zhou-shi²

(1. School of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China;

2. Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Corresponding author, E-mail: comahj@126.com

Abstract: The relationship between the residual wavefront error of an adaptive optical system and the coherence efficiency in a satellite to ground coherent Binary Phase Shift Keying(BPSK) laser communication system was explored. The dynamic characteristics of coherence efficiency and the Bit Error Probability(BEP) under adaptive optical correction were discussed, then the influence of atmospheric scintillation on the Bit Error Ratio(BER) of coherent laser communication was analyzed. The theoretical relationship between the Root Mean Square(RMS) of residual wavefront error and the coherence efficiency was derived under an assumption of the uniform intensity distribution. Through the histogram frequency method, the cumulative distribution function of coherence efficiency and BEP were simulated, and the mean BER of communication system was calculated. The results show that the coherence efficiency is mainly affected by the residual wavefront error when the RMS of residual wavefront error is above 1 rad. Moreover, the BER can reach 10^{-8} level when the adaptive correction achieves diffraction limit. In this case, the BER from atmospheric scintillation may increase 100 times.

Keywords: coherent laser communication; atmospheric turbulence; adaptive optical system; wavefront error; atmospheric scintillation; Bit Error Rate(BER)

收稿日期:2013-10-13;修订日期:2013-12-12.

基金项目:中国科学院自适应光学重点实验室开放基金资助项目(No. LA0F201304);中国高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. ZYGX2011J123)

1 引言

自由空间光通信技术近年来取得了突破性的进展^[1-2]。在高速卫星激光通信实验项目上,德国 Terrasar-X 卫星搭载的激光通信终端与欧洲空间局(The European Space Agency, ESA)光学地面站和移动光学站之间分别成功进行了 5.6 Gb/s 的相干激光通信演示^[3]。这一实验的成功依赖于几个条件:首先较短的链路距离(<1000 km)使得接收端具有较高的功率密度(60°天顶角时 415 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, 0°天顶角时 1.3 mW/m^2)^[4];其次选择在 2 100 m 海拔以上的光学站台上运行 135 mm 口径的激光通信终端,降低了大气湍流的干扰;最后,在地面移动光学终端上仅部署 65 mm 口径的接收天线,几乎可以完全忽略大气相位的干扰。在面向欧洲数据中继系统(The European Data Relay System, EDRS)项目的 GEO-地激光相干通信链路中,ESA 的光学地面站计划采用 1 m 口径的光学接收天线,并采用自适应光学系统以补偿大气相位畸变。该系统采用微机电系统(MEMS)变形镜和高速近红外 InGaAs 哈特曼波前探测器,系统的最大闭环带宽为 20 kHz,0 dB 带宽为 500 Hz^[5]。

国内方面,海洋 2 号卫星运行在近地轨道,其搭载的激光通信终端采用强度调制和直接探测(IM/DD)通信体制,没有自适应光学系统改善下行链路通信性能的需求。迄今为止,受光锁相环和相干接收机技术的限制,国内没有高码率自由空间相干通信的实验,因此也没有在通信系统中实际部署自适应光学系统的实验研究。

总的来说,国内外在自由空间激光通信与自适应光学技术这一交叉领域的研究主要分为两类。第一类是功能验证性实验研究,即在通信实验中加载自适应光学系统,比较自适应校正前后的误码率^[6-7]、斯特列尔比,并采用数据分析的方式总结自适应光学系统的效果^[8-9]。该研究在上行链路闪烁被通信接收端自适应相位校正抑制的情况下,对 IM/DD 通信系统的性能改善效果是明显的;第二类是通过理论分析来研究具有相位畸变时的光学相干接收问题^[10-14],包括相干效率损失,大气影响下的信噪比概率密度分布等,并给出了若干的理论表达式和仿真曲线作参考,但这些理论公式还没有收敛到相干光接收机以及与之

匹配的自适应光学系统工程设计这一目标上来。

自适应光学系统具有校正大气相位畸变,改善星地激光通信系统性能的能力。下行链路接收端的相位校正可抑制上行链路的大气闪烁,增大上行链路接收端的平均功率并减小强度大幅度衰落的概率。实验结果显示,闪烁分布的概率密度函数将向低值端收缩^[15],理论估计闪烁指数的改善与 1/N 成正比(N 为相位完全校正阶数)^[16]。闪烁抑制对强度调制和相位调制的通信方式都有效;但在 LEO-地链路中可能导致通信性能恶化,因为大气等晕角可能小于上行链路的超前角,这使得自适应相位补偿失效。下行链路接收端相位校正可以极大地降低接收机的相干效率损失,增强接收机的信噪比。在直接光纤耦合的方式中,耦合效率得到了显著提升^[17]。采用大口径天线接收信号可以提升相干效率,通过增强接收信号功率能够提高接收机的信噪比。

本文通过研究自适应光学系统校正相位残差与通信系统误码率的关系,以及接收孔径上强度起伏对通信误码率的影响,确定了相干激光通信中自适应光学系统的边界参数,从而为设计和检测相干通信用自适应光学系统打下基础。

2 数学分析

为了简化分析,本文假设本振光为平面波,接收天线孔径上的信号光场强度是均匀的。本振光场为:

$$E_{LO} = A_0 e^{i(2\pi ft + \varphi_0)}, \quad (1)$$

其中: A_0 , f 和 φ_0 分别是本振光的振幅、频率和相位。

接收信号光场为:

$$E_s = A_s e^{i(2\pi ft + \varphi_s)}, \quad (2)$$

其中: A_s , f 和 φ_s 分别是信号光的振幅、频率和相位。

根据相干接收理论,光电探测器接收的总光功率为:

$$I = \int_S (E_{LO} + E_s) (E_{LO} + E_s)^* ds = \int_S [A_0^2 + A_s^2 + 2A_0 A_s \cos(\Delta\varphi)] ds, \quad (3)$$

其中: $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_0$, 表示信号光与本振光的相位差, S 表示望远镜接收孔径面积。在高速激光通

信系统中,每个码元的持续时间小于 1 ns,而大气湍流的时间频率为 ms 量级;根据湍流“冻结”假设,在每一个码元的探测积分时间内可认为大气湍流产生的相位畸变是冻结的,因此,可将 $\Delta\varphi$ 展开成两部分:

$$\Delta\varphi = \varphi(\mathbf{r}) + \varphi(t), \quad (4)$$

式中: $\varphi(\mathbf{r})$ 为大气湍流导致的相位畸变, $\varphi(t)$ 为信号调制相位。其中 $\varphi(\mathbf{r})$ 与时间无关, $\varphi(t)$ 与空间坐标无关,在二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying,BPSK)调制模式下,根据码元值为 0 或 1,调制相位 $\varphi(t)$ 的值取 π 或 0。

根据式(3)和式(4),推导出相干接收功率 i_s 为:

$$i_s = \begin{cases} 2A_o A_s \int_S \cos[\varphi(\mathbf{r})] ds, & \varphi(t) = 0 \\ -2A_o A_s \int_S \cos[\varphi(\mathbf{r})] ds, & \varphi(t) = \pi \end{cases}. \quad (5)$$

在无像差系统中,相干光通信系统的相干接收效率最高, i_s 的归一化最大值为 1。由式(5)可知,大气湍流导致的像差畸变会导致相干效率下降,因此将 $\varphi(\mathbf{r})$ 作为自适应光学系统的相位校正残差,并定义式(5)中余弦积分的归一化值为系统的相干效率,作为自适应光学系统校正效果的评价指标。

在相干激光通信系统中,如果自适应光学系统能够良好工作,相位校正残差的均方根值可认为小于 1 rad,因此在将 $\varphi(\mathbf{r})$ 做泰勒展开并取小误差近似可得:

$$\eta = \frac{1}{S} \int_S \cos[\varphi(\mathbf{r})] ds = \frac{1}{S} \int_S \left[1 - \frac{\varphi^2(\mathbf{r})}{2} \right] ds = 1 - \frac{\sigma^2}{2}. \quad (6)$$

另一方面,自适应校正相位残差 $\varphi(\mathbf{r})$ 可以展开成标准泽尼克多项式,因此本文通过仿真分析不同阶泽尼克多项式表示的像差对相干效率的影响来分析和评价自适应校正相位残差对相干总效率的影响。公式(5)在 $\varphi(\mathbf{r})$ 为高阶像差时没有解析表达式,可以通过数值仿真的方式求取积分值。仿真得到前 37 阶(不含 piston)泽尼克多项式表示的像差对相干效率的影响如图 1 所示。

从图 1 的仿真结果可知,当不同阶次的残余误差的均方根值为 1 rad(或 $\lambda/6$)时,BPSK 调制模式的相干接收系统的性能下降最大值为 2.5 dB。在前 37 阶(不包含 piston 像差)泽尼克多项

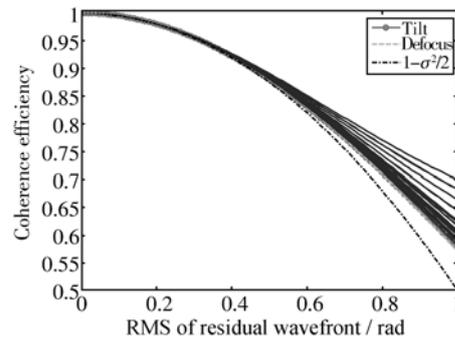


图 1 前 37 阶泽尼克多项式表示的像差均方根值与相干效率的关系及其与小像差近似下的结果比较,其余曲线表示第 5 至 37 阶泽尼克像差的结果

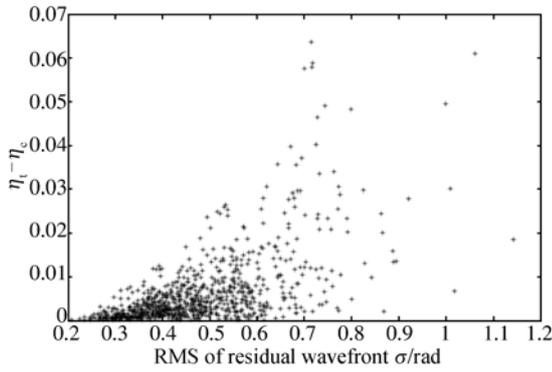
Fig. 1 Relationship between coherence efficiency and the first 37 orders of Zernike polynomials, and a comparison with result of little aberration approximation; other curves except tilt and defocus are results of the 5 to 37 order of Zernike aberrations

式表示的像差中,倾斜和离焦对相干效率的影响最大,并且它们的影响几乎一致。

星间相干通信系统设计的像差一般都要求达到衍射极限才能满足数据传输的低误码率要求,因此星地链路中的自适应光学系统也应该能充分补偿大气像差。在实际的星地激光相干通信链路中,自适应系统所分配的链路预算一般不会大于 3 dB,因此真正有意义的是残差小于 1 rad 时的相干效率值。图 1 只画出了残差 RMS 值在 0~1 rad 的仿真结果。如果自适应校正达到衍射极限 ($\sigma < 0.4$ rad),式(6)可以很好地近似表示相干效率与相位残差的关系。当自适应校正无法达到衍射极限时 ($0.4 \text{ rad} < \sigma < 1 \text{ rad}$),式(6)计算的相干效率误差可能大于 0.25。

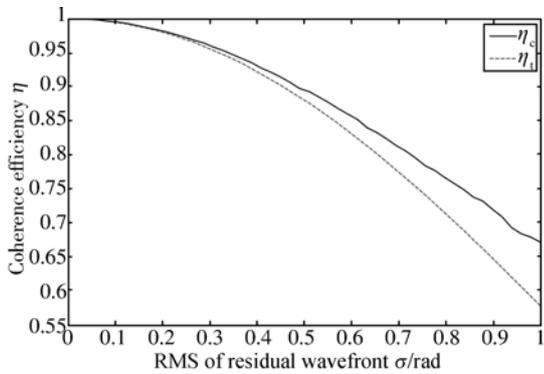
本文采用实际闭环系统的相位残差数据和前 37 阶(不含 piston)泽尼克多项式拟合残差数据,分别对均方根值为 σ_φ 的倾斜像差条件下的相干效率 η 和均方根值为 σ_φ 的 37 阶复合相位残差条件下的相干效率 η 进行了仿真计算。其中多阶复合相位残差的泽尼克系数采用高斯分布的随机数。

从图 2 可以看出,等效倾斜像差下的相干效率 η 是一个比较好的近似下限值,在自适应校正残差取值为 0~1 rad 时,误差小于 0.1,可以作为自适应光学相位校正性能的评价指标。采用 η 表征星地相干激光通信自适应系统校正性能的优



(a) 实际自适应校正闭环残差数据

(a) Experimental residual wavefront data



(b) 前 37 阶泽尼克多项式拟合残差数据

(b) Residual wavefront fitted by the first 37 orders of Zernike polynomials

图 2 相同均方根值的等效倾斜像差和高阶复合像差条件下的相干效率比较

Fig. 2 Comparision between η_e and η_c at the same RMS of residual wavefront

势还在于 η_e 有解析表达式, 可以用以深入分析自适应校正条件下的误码率。

光束孔径上的倾斜像差为:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \varphi_{\text{tilt}} = \tan(\beta) r \cos(\theta) = \beta r \cos(\theta), \quad (7)$$

其中: r 和 θ 表示极坐标变量, φ_{tilt} 表示倾斜像差, β 表示像差相对于光束截面的倾角。则归一化相干效率的下限为:

$$\eta_{\min} = \eta_c = \frac{1}{S} \int_S \cos[\varphi(\mathbf{r})] ds = \frac{1}{S} \int_0^{R^2} \int_0^{2\pi} \cos[\beta r \cos(\theta)] r dr d\theta = 2\pi R^2 \frac{1}{S} \frac{J_1(kR\beta)}{kR\beta} = 2 \frac{J_1(kR\beta)}{kR\beta}, \quad (8)$$

J_1 为一阶贝塞尔函数, R 为光束口径。 $k =$

$2\pi/\lambda$ 。定义 σ_{tilt} 倾斜像差的均方根值为:

$$\sigma_{\text{tilt}} = \sqrt{\frac{1}{S} \int_0^{R^2} \int_0^{2\pi} [r \tan \beta \cos \theta]^2 r dr d\theta} = \frac{kR\beta}{2}. \quad (9)$$

由此归一化相干效率的最小值与相位残差均方根值的关系为:

$$\eta_{\min} = \frac{1}{S} \int_S \cos[\varphi(\mathbf{r})] ds = 2 \frac{J_1(2\sigma)}{2\sigma}, \quad (10)$$

其中: σ 表示自适应校正相位残差的均方根值, η_{\min} 与 σ 的关系如图 3 所示。

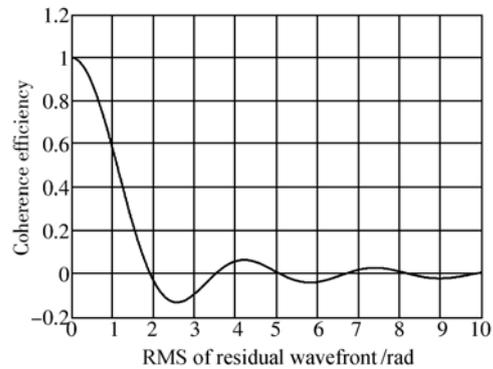


图 3 相干效率下限与波前残差之间的关系

Fig. 3 Relationship between lower limit of coherence efficiency η_{\min} and RMS of residual wavefront σ

从图 3 可以看出, 随着自适应校正残差均方根值的增大, 相干效率的下限并不单调下降, 而是呈现出震荡收敛的趋势。其中负值的产生是由于相干功率中的直流部分被减去后的结果, 并不表示实际接收功率出现负值。

相干效率曲线的震荡收敛在数学上是由式(10)的贝塞尔函数的取值分布决定的; 在物理过程上是两个倾斜的平面波在圆孔径上相干, 干涉条纹出现周期性质。随着两个平面波角度的增大(均方根值增加), 发生相干效应的区域面积在减少, 两种效应的结合出现了相干功率的震荡收敛特性。

3 通信性能的动态特征

通信系统中接收信号的起伏可以看作是一个随机过程, 采用随机过程的统计参数作为系统性能评价指标并不是最佳的, 统计参数只能反映随机过程的某种平均特征, 而不能反映随机过程的细节。对于高速通信系统来说, 短促的偶发性误

差则可能引起数百万个连续误码。因此分析通信系统性能既要关注平均误码率这一总体特征,更要研究系统的误码概率分布,特别是要避免高误码率出现的可能性。概率分布函数不但包含了随机过程物理量的分布细节,也能导出平均误码率等各种统计物理量。

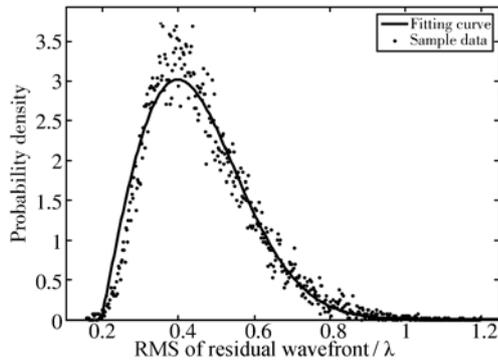


图 4 自适应闭环校正波前残差均方根值的概率密度函数

Fig. 4 Probability density function of RMS of residual wavefront under AO compensation

一组包含 20 000 个自适应光学系统闭环实验数据的分析结果表明,自适应校正波面残差的均方根值 σ 可以用瑞利分布拟合,其概率密度函数及其拟合曲线如图 4 所示;其分布函数的尺度参数与自适应系统的闭环校正性能有关,概率密度函数的拟合曲线可表示为:

$$f_{\sigma} = \frac{(\sigma - 0.2)}{0.04} e^{-\frac{(\sigma - 0.2)^2}{0.08}}. \quad (11)$$

利用式(10)以及实验获得实际波前残差数据,计算出 20 000 次自适应光学闭环校正下的相干效率值,通过频率直方图方法可以获得相位残差与相干效率之间的关系,如图 5 所示。

由图 5 可知,本次自适应校正的效果比较差,从横坐标的取值范围可知相干效率的实际最大值为 0.6,并且相干效率取值在 0.12~0.6 的概率非常低;累积概率分布曲线的最大转折点为 (0.13, 0.97),意味着有 97% 的概率相干效率小于 0.13,即相当于系统信噪比只有设计最佳信噪比的 1/8。假设该自适应系统性能提升 3 倍,相位残差的平均均方根值为 $\lambda/6$,则相干效率的概率分布如图 6 所示。

比较图 6 和图 5 可知,相干效率的概率密度曲线向相干效率的高值端收缩,相干效率有了极

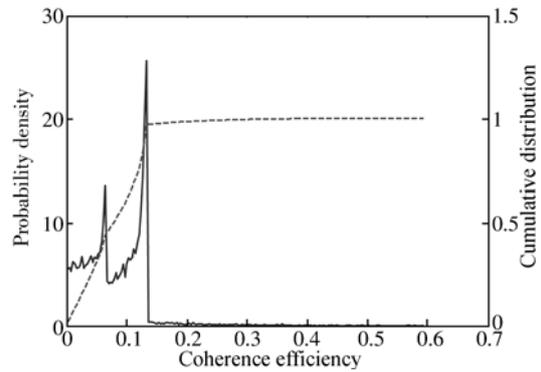


图 5 自适应闭环校正条件下相干效率的概率分布

Fig. 5 Probability density function of coherence efficiency η_1

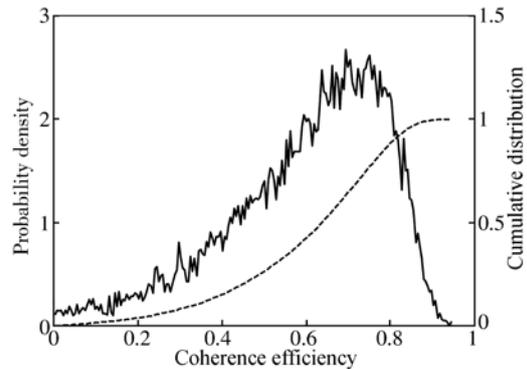


图 6 相位残差的平均均方根值为 $\lambda/6$ 时相干效率下限值 η_{\min} 的概率分布

Fig. 6 Probability density function of η_{\min} at mean value of RMS of residual wavefront of $\lambda/6$

大的改善。因此分析了此种条件下的系统误码率水平,以评估自适应光学系统的效用。

假设 BPSK 调制的空间光通信系统设计的最佳信噪比为 SNR_0 ,则自适应校正条件下的动态信噪比为 $\eta_{\min}^2 \text{SNR}_0$,同时假设系统噪声为高斯分布的散粒噪声,则误码率(Bit Error Probability, BEP)为:

$$\text{BEP} = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left[\sqrt{\frac{\eta_{\min}^2 \text{SNR}_0}{2}} \right] \right]. \quad (12)$$

由于无自适应光学校正时光通信系统的信噪比(或相干效率)可能为 0,则 η_{\min} 总是小于 1,因此自适应光学校正下的动态信噪比永远小于设计最佳信噪比。由此表明,动态信噪比越接近通信系统设计的最佳信噪比,自适应光学系统的相位校正性能越好,通信误码率越低。

假设系统的最大信噪比 SNR_0 为 36,即设计最佳误码率为 10^{-9} ,而相位残差服从图 4 所示的瑞利分布,其平均均方根为 $\lambda/6$ 时 BEP 的概率分布如图 7 所示。此时的平均误码为 0.002 3,显然不能满足通信要求,因此相干激光通信系统中自适应光学子系统相位校正残差的均方根值应该小于 1 rad。假设系统的校正残差达到衍射极限,即均方根值为 0.07λ ,则误码概率的分布如图 8 所示,此时的平均误码率为 3.6×10^{-8} 。

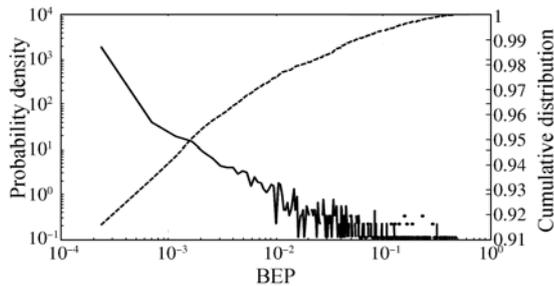


图 7 自适应校正平均波前残差为 1 rad 时的误码概率分布

Fig. 7 BEP at mean value of RMS of residual wavefront of 1 rad under AO compensation

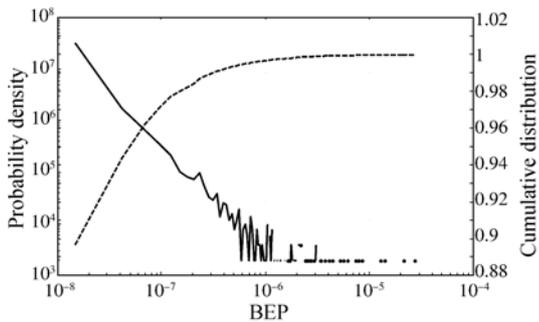


图 8 自适应校正平均波前残差达到衍射极限时的误码概率分布

Fig. 8 Distribution of BEP with RMS of residual error at diffraction limit

4 闪烁条件下的自适应校正性能分析

自适应光学在接收端只能校正相位畸变而无法改善大气湍流导致的强度闪烁,从式(5)可知,相干光通信系统的实际性能必须考虑接收信号的起伏,因此闪烁导致的强度起伏应该被看作自适应光学系统的边界约束条件。

通常认为大气湍流导致的光强闪烁符合对数正态分布。根据能量守恒原理,接收信号的强度平均值为无湍流条件下的接收信号强度,湍流引起的强度闪烁使得接收光强可能大于理论均值,也可能小于理论均值。假设将接收光强的理论均值作为系统设计的基点,通过仿真可以分析不同闪烁强度下的通信指标,以了解它们对自适应子系统性能的影响。通过生成大样本的符合瑞利分布的波前残差均方根值随机数以及符合对数正态分布的接收光强随机数,再根据式(5)、式(10)、式(12)求取系统的误码概率和平均信噪比,数值仿真结果如图 9 所示。

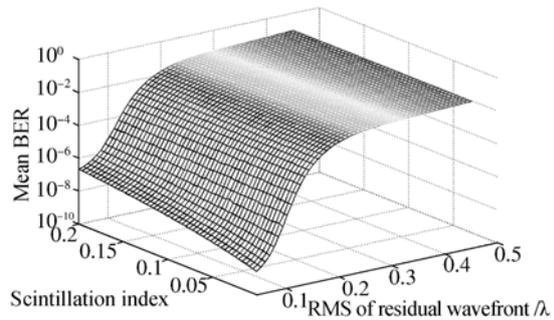


图 9 最佳误码率为 10^{-9} 时,平均误码率与闪烁指数和波前残差的关系

Fig. 9 Mean BERs vs. scintillation index & residual wavefront with designed optimum BER of 10^{-9}

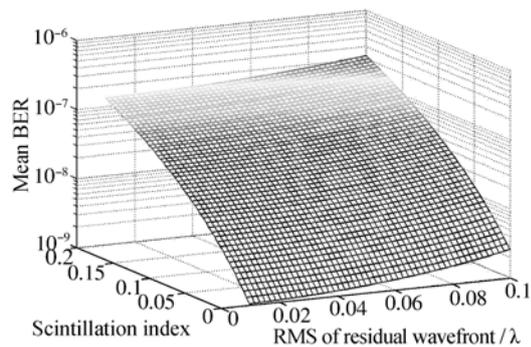


图 10 最佳误码率为 10^{-9} 时,低波前残差条件下平均误码率与闪烁指数和波前残差的关系

Fig. 10 Mean BERs vs. scintillation index & small residual wavefront with designed optimum BER of 10^{-9}

根据图 9 可知,平均误码率与闪烁指数和波前残差都存在正相关关系,在波前残差较大时,由残差波前导致的误码率恶化起主导作用;在波前

残差达到衍射极限时,闪烁可导致误码率恶化两个数量级以上。通常,研究关注的是经过自适应校正后的通信状态,从图 10 可知,当自适应校正残差接近衍射极限,系统误码率要求小于 10^{-6} 时,闪烁强度对误码率的影响比波前残差的影响大,因此自适应光学系统的设计指标之一的波前残差应该有一个下限,低于该下限时闪烁的影响则没有实际工程意义。

5 结 论

在星地相干激光通信链路中,必须采用自适应光学校正信号相位畸变以降低误码率。本文在假设接收信号光强度孔径分布均匀的条件下,将自适应校正相位残差的均方根值作为自适应光学系统设计的主要参数,而闪烁指数作为系统设计的边界约束条件。仿真结果表明,考虑到大气湍流效应的动态特征,概率分析方法应该作为星地

光通信系统链路设计的主要方法,链路参数的概率密度函数既可以反映系统性能的细节,也能推导出各种统计平均参数。

对自适应光学系统闭环相位校正残差均方根值的概率分析结果表明,相位残差中残余倾斜仍然占主导地位,因此相位残差均方根值的概率密度函数接近于具有零点漂移的瑞利分布形式,并且由于倾斜对相干效率的影响最大,因此对倾斜进行充分校正是提高自适应光学相位校正条件下相干激光通信性能的最直接有效的方法。结果表明,自适应光学相位残差必须接近衍射极限水平,才能获得 10^{-8} 以上的系统平均误码率。

本文提出的信号光强度分布和相位分离处理的方法和结果在大口径接收系统中的适用程度还有待进一步研究。在研究相干效率与接收信号复振幅参数的关系时,需要同时考虑接收孔径上接收信号强度起伏和相位畸变对相干效率的影响,并要研究这一影响在时间序列上的统计特征。

参考文献:

- [1] 付强,姜会林,王晓曼,等.空间激光通信研究现状及发展趋势[J].中国光学,2012,5(2):116-125.
FU Q,JIANG H L,WANG X M, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
- [2] 吴从均,颜昌翔,高志良.空间激光通信发展概述[J].中国光学,2013,6(5):670-680.
WU CH J,YAN CH X,GAO ZH L, Overview of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)
- [3] SODNIK Z, ARMENGOL J P, CZICHY R. et al. Adaptive optics and ESA's optical ground station [J]. *SPIE*, 2009, 7464: 746406-1-9.
- [4] HORWATH J, DAVID F, KNAPEK M, et al. Coherent transmission feasibility analysis [J]. *Lasers and Applications in Science and Engineering, International Society for Optics and Photonics*, 2005: 13-23.
- [5] ELLERBROEK B L, BERKEFELD T, SOLTAU D, et al. Adaptive optics for satellite-to-ground laser communication at the 1 m telescope of the ESA optical ground station, Tenerife, Spain [J]. *SPIE*, 2010, 7736: 77364C1-8.
- [6] BARBIER, P R, RUSH D W, PLETT M L, et al. Performance improvement of a laser communication link incorporating adaptive optics [J]. *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 1998: 93-102.
- [7] TYSON R K, CANNING D E, THARP J S. Measurement of the bit-error rate of an adaptive optics, free-space laser communications system, part 1: tip-tilt configuration, diagnostics, and closed-loop results [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(09): 096002.
- [8] WEYRAUCH T, VORONTSOV M T. Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments [J]. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, 2004, 1(4): 355-379.
- [9] THOMPSON C A, KARTZ M W, FLATH L M, et al. Free space optical communications utilizing MEMS adaptive optics correction [J]. *SPIE*, 2002, 4812: 129-138.
- [10] TYSON R K. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications [J]. *JOSA A*, 2002, 19(4): 753-758.

- [11] CHASE D M. Power loss in propagation through a turbulent medium for an optical-heterodyne system with angle tracking [J]. *JOSA*, 1966, 56(1): 33-42.
- [12] SANDALIDIS H G, TSIFTIS T A, KARAGIANNIDIS G L. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(20): 4440-4445.
- [13] HOVERSTEN E V, HARGER R, HAMLE S. Communication theory for the turbulent atmosphere [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(10): 1626-1650.
- [14] WINICK K A. Atmospheric turbulence-induced signal fades on optical heterodyne communication links [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(11): 1817-1825.
- [15] TYSON R K, CANNING D E. Bit-error rate improvement of a laser communication system with low-order adaptive optics [J]. *SPIE*, 2002, 4821: 82-87.
- [16] TYSON R K. Adaptive optics and ground-to-space laser communications [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(19): 3640-3646.
- [17] WEYRAUCH T, VORONTSOV M A, GOWENS J. *et al.* Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [J]. *SPIE*, 2002, 4489: 177-184.

作者简介:



黄 健(1981—),男,贵州遵义人,讲师,博士,2010年于中科院光电技术研究所获得博士学位,主要研究方向为空间光通信,自适应光学。E-mail: comahj@126.com

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)