

大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响

武云云^{1,2} 李新阳¹ 饶长辉¹

(¹ 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过研究不同大气湍流条件下的系统误码率(BER)来说明大气湍流引起的波前畸变给零差二进制相移键控(BPSK)相干光通信系统带来的恶劣影响。结果显示,大气湍流引起的像差可以独立于系统信噪比(SNR)作用于相干光通信系统,导致误码出现。即使在 SNR 无限大的情况下,当接收光信号的波面峰谷值(PV)大于一个波长后,就容易出现误码;并且随着 SNR 的降低,对波面 PV 的要求更加严格。另外,大气湍流引起的光强起伏和相位畸变会导致相干混频效率急剧下降,从而增加系统误码率。

关键词 光通信;零差二进制相移键控;大气湍流像差;误码率;相干混频效率

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0606002

Effect of Atmospheric Turbulence Aberration on the Bit-Error Performance of Homodyne Binary Phase Shift Keying Coherent Optical Communication

Wu Yunyun^{1,2} Li Xinyang¹ Rao Changhui¹

(¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The bit error rate (BER) at different atmospheric turbulence conditions is analyzed, which illustrates the adverse affection of wave-front aberration caused by atmospheric turbulence on binary phase shift keying (BPSK) coherent optical communication system. Atmospheric turbulence aberration can act on optical communication system, which leads to bit error and is independent of system signal-to-noise ratio (SNR). Simulation results note that bit error is prone to emerge in the case of infinite SNR, when the peak-to-valley (PV) value of wave-front of received optical signal is greater than one wavelength. And the PV value of wave-front is strictly required with the decreasing of SNR. In addition, coherent mixing efficiency decreases rapidly, which is caused by the intensity fluctuation and phase aberration, consequently, resulting in the system bit error rate increasing.

Key words optical communications; homodyne binary phase shift keying; atmospheric turbulence aberration; bit error rate; coherent mixing efficiency

OCIS codes 060.1660; 060.2920; 060.4510; 010.1330

1 引 言

空间大气光通信技术是未来光通信发展的重要领域。从 20 世纪末至今,各国的空间非相干光通信已经大有进展。近几年,研究人员开始转向对相干

光通信的研究。相对于直接探测的非相干光通信而言,相干光通信在接收端有本振光参与混频探测,极大地提高了光通信的探测灵敏度。理论上讲,在所有相干光通信系统中,零差二进制相移键控

收稿日期: 2013-01-24; 收到修改稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61205069)资助课题。

作者简介: 武云云(1985—),女,博士研究生,主要从事大气激光通信方面的研究。E-mail: wuyunyun_1985@163.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

(BPSK)系统具有最佳的接收灵敏度,可以实现最长的传输距离^[1]。目前欧洲已经成功实现了5.6 Gb/s星间与星地零差BPSK相干光通信实验,但由于大气湍流的影响,接收口径尺寸受到极大限制。一般接收口径要小于大气相干长度,才能忽略大气湍流带来的不利影响^[2~4];当接收口径大于大气相干长度时,大气湍流引起的波前畸变和光强起伏会使信号光与本振光的互相干面积大大减小,破坏其空间相位和振幅的匹配条件,使相干接收功率降低,严重损害光通信系统的性能。特别是针对相移键控(PSK)的光通信系统,光波相位的随机变化对基于相位调制解调的相干光通信系统误码率(BER)影响很大。

Belmonte等^[5,6]研究了大气像差及自适应光学补偿在相干外差探测中的作用,但主要考虑的是外差探测时的信噪比(SNR)与BER,没有具体分析其在零差探测中的影响。刘宏展等^[7]仿真研究了天线像差对星间零差BPSK系统SNR及BER的影响,但没有考虑大气湍流像差对零差BPSK相干光通信

的影响。本文则基于零差BPSK空间相干光通信系统理论,建立了一套完整的调制发射、湍流大气传输、相干探测解调的光通信系统模型来研究大气湍流造成的像差对相干光通信系统的影响,着重分析了波前畸变程度与相干零差混频效率和BER的关系。

2 零差BPSK相干光通信系统原理和理论建模

一个典型的BPSK空间相干光通信系统如图1所示。数字信号通过相位调制器加载到光波上,携带信号的光波扩束至一定口径后发射至大气空间传输。经过一定距离的传输后用望远镜接收并与本地激光进行混频,将混频得到的一对相位差为 180° 的信号接入平衡探测器,平衡探测器输出的电流信号接到模数转换器(A/D)上,通过设置判决门限的方法解调出数字信号,最终与发射端数据比较得到系统BER。图1所示的光学锁相环(OPLL)用来控制本振激光器使其与信号光的频率和相位保持一致。

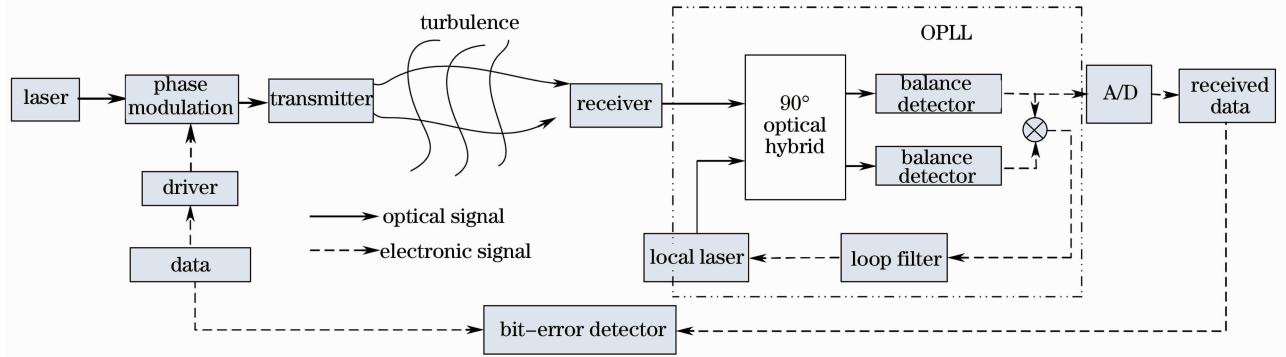


图1 BPSK相干光通信系统方案示意图

Fig. 1 Diagram of BPSK coherent optical communication system

2.1 调制发射过程

发射端经过二进制相位调制后的信号光场可表示为

$$E_t = A_0 \exp[-i(\omega_s t + \varphi_0 + \varphi_m)]. \quad (1)$$

式中 A_0 为初始振幅分布, ω_s 为光载波频率, φ_0 为初始相位分布, φ_m 为调制相位,调制后0相位对应于数字信号“1”, π 相位对应于数字信号“0”,

$$\varphi_m = \begin{cases} 0, & x = 1 \\ \pi, & x = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 x 代表数字信号。

2.2 大气传输过程

光束在空间经过大气传输必然会受到大气湍流效应的影响。大气湍流引起的波前畸变和光强起伏会使信号光与本振光的互相干面积大大减小,破坏

其空间相位和振幅的匹配条件,使相干接收功率降低,严重损害光通信系统的性能。通常用大气湍流结构常数 C_n^2 和大气相干长度 r_0 来表征湍流强弱。

文中仿真水平大气传输,用相位屏和真空衍射的方式来模拟大气湍流传输的过程。每种湍流条件下用快速傅里叶变换(FFT)谱反演法生成10个符合Kolmogorov谱的二维相位屏^[8],相屏网格数为 2048×2048 。发射光束的波长为1064 nm;光束收发口径 $D=300$ mm,网格数为 128×128 ;传输网格数为 256×256 ;总的传输距离 $L=2$ km;仿真中取 C_n^2 分别为 2.53×10^{-16} , 4.97×10^{-16} , 8.03×10^{-16} , 1.58×10^{-15} , $3.7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,对应的 r_0 分别为0.3, 0.2, 0.15, 0.1, 0.06 m,即 D/r_0 分别为1, 1.5, 2, 3, 5。仿真得到经过几种不同湍流后的光强和相

位分布,并对相位数据进行解缠绕后再进行后续分析。

2.3 相干探测及解调过程

光束经过湍流大气传输后到达接收端,接收望远镜口径为 300 mm。接收到的信号光 E_s 的振幅 A_s 和相位 φ_s 都是发射端的光场经过湍流后得到的含随机畸变的振幅和相位。 E_L 为本振光,其初始振幅和初始相位分别为 A_L 和 φ_L ,

$$E_s = A_s \exp[-i(\omega_s t + \varphi_s)], \quad (3)$$

$$E_L = A_L \exp[-i(\omega_L t + \varphi_L)]. \quad (4)$$

采用相干零差探测的方式,两束光频率相等,即 $\omega_s = \omega_L$ 。

信号光和本振光经过 180° 混频后得到相位相差 π 的两束光,其强度为

$$I_0 = \frac{1}{2} [|E_s|^2 + |E_L|^2 + 2A_s A_L \cos(\varphi_s - \varphi_L)], \quad (5)$$

$$I_{180} = \frac{1}{2} [|E_s|^2 + |E_L|^2 - 2A_s A_L \cos(\varphi_s - \varphi_L)]. \quad (6)$$

将混频后的两束光接入平衡探测器。假设探测器探测面积为 U ,则平衡探测器的零频(ZF)输出电流为

$$i_{zf} = R \left(\int_U I_0 dU - \int_U I_{180} dU \right) = \frac{2e\eta_q}{h\nu} \int_U A_s A_L \cos(\varphi_s - \varphi_L) dU, \quad (7)$$

式中 R 为探测器灵敏度, $R = \frac{e\eta_q}{h\nu}$, e 为电子电量, η_q 为量子效率, h 为普朗克常数, ν 为载波光频率。光波波长 λ 为 1064 nm,则 $\nu = \frac{c}{\lambda} = 2.8 \times 10^{14}$ Hz。

通过设置判决条件,当 $i_{zf} \geq 0$ 时输出信号“1”;当 $i_{zf} < 0$ 时输出信号“0”,可以解调出数字信号,并通过对比接收信号与发射信号,计算得到 BER。

一般来说,本振光的功率远强于信号光,所以平衡探测中本振光的散粒噪声占主要地位,信号光和本振光在探测面上的光功率分别为 $P_s = \int_U |E_s|^2 dU$, $P_L = \int_U |E_L|^2 dU$, B 为探测器带宽,则噪声功率

$$\langle i_N^2 \rangle = \frac{2e\eta_q P_L B}{h\nu} = \frac{2e\eta_q B}{h\nu} \int_U |E_L|^2 dU. \quad (8)$$

因此系统 SNR 可表示为

$$R_{SN} = \frac{\langle i_{zf}^2 \rangle}{\langle i_N^2 \rangle} = \frac{2e\eta_q P_s}{h\nu B} \frac{\left[\int_U A_s A_L \cos(\varphi_s - \varphi_L) dU \right]^2}{\int_U |E_s|^2 dU \int_U |E_L|^2 dU}. \quad (9)$$

可定义相干零差混频效率为

$$\eta_{\text{homodyne}} = \frac{\left[\int_U A_s A_L \cos(\varphi_s - \varphi_L) dU \right]^2}{\int_U |E_s|^2 dU \int_U |E_L|^2 dU}. \quad (10)$$

相干混频效率是相干探测中的重要评判标准,它反映了本振光和信号光的匹配程度。相干检测的 SNR 可达到量子噪声限的优势是在假设混频效率为 100% 的前提下得出的,然而信号光与本振光的振幅和相位的不匹配都会导致混频效率下降。

从(9)式和(10)式可以看到,大气湍流引起的光强起伏和相位畸变会造成信号光和本振光相位失配,从而降低相干混频效率和系统 SNR。另外,从(7)式和判决条件可以推出,相位的随机变化还会直接导致系统出现错误判决,增加相干光通信系统的 BER。

3 仿真结果分析

采用蒙特卡罗仿真方法,即让 N 个数字符号依次通过仿真系统。对比发射和接收的数字符号,统计错误判决个数 N_e ,从而得到 BER。该方法在通信系统仿真中应用广泛。实验次数 N 越大其结果的可信度越高,由于计算软件的限制,每个 D/r_0 情况下仅仿真了 1024 frame。尽管 1024 frame 数据最多只能得到 10^{-3} 量级的 BER,但是从后续的分析中可以看到,各种湍流情况下都有误码出现。因此虽然仿真中得到的误码个数不是唯一确定的,但是仿真所得到的一些相关结论是值得信任的。表 1 是不同湍流条件下误码个数的对比。 D/r_0 用来衡量大气湍流的强弱,随着 D/r_0 变大,大气湍流逐渐变强。从表 1 中可以看到,整体平移(piston)像差对 BER 的影响很大,在存在整体平移的情况下,BER 与湍流强度无直接关系,这点与 BPSK 的调制特点有关。在 BPSK 方案中,以相位的 π 相移来代表符号信息,因此当本振光和信号光有 $(2k+1)\pi$ (k 为任意整数)的整体平移后,就会出现误判。在实际的光通信系统中,需要用光学锁相环来使信号光和本振光的相位保持一致,即可消除整体平移的影响^[9,10]。因此在后面的分析中,只考虑整体平移以外的相位

随机畸变对光通信系统性能产生的影响。

表 1 不同湍流条件下误码个数 N_e 统计($N=1024$)

Table 1 Bit-error number statistics under different turbulence conditions ($N=1024$)

D/r_0	With piston	Without piston		
	$R_{SN} \rightarrow \infty$	$R_{SN}=8$ dB	$R_{SN}=16$ dB	$R_{SN} \rightarrow \infty$
1	384	9	0	0
1.5	524	39	10	0
2	520	110	73	57
3	542	273	241	230
5	457	448	440	435

在不考虑整体平移的情况下,系统 SNR 对 BER 的影响不可忽视。在某种特定的湍流条件下,接收端的信号功率是一定的。在此基础上逐渐增加噪声功率(该噪声独立于大气湍流的加性高斯白噪声),计算得到 SNR 和 BER 的关系。表 1 列举了几种不同 SNR 情况下的误码个数。图 2 展示了不同湍流条件下 SNR 和 BER 的关系,并与无湍流影响的情况做了对比。可以看到,在同种湍流条件下,随着 SNR 的增加,BER 逐渐减小。在同种 SNR 条件下,湍流强度越大,系统 BER 就越高。同时也可以看到,大气湍流引起的像差对光通信系统的影响很大,即使在 SNR 较高的情况下(包括 SNR 趋于无穷大),湍流引起的像差依然会使通信系统出现较高的 BER。

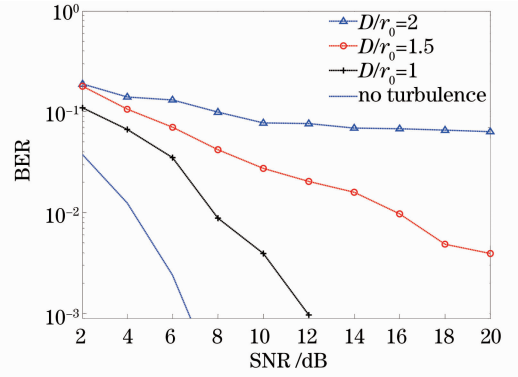


图 2 不同湍流强度下 SNR 和 BER 的关系
Fig. 2 Relationship between BER and SNR under different turbulence conditions

单帧波面的畸变程度可以用波面均方根(RMS, R_{RMS})和峰谷值(PV, d_{PV})来衡量。对通过多次随机实验获得的数据组而言,可以通过分析正确判决和错误判决时畸变波面 R_{RMS} 和 d_{PV} 的概率密度分布函数(PDF)来说明波面畸变程度和系统误码之间的关系以及出现误码的原因。选取 $D/r_0=1.5, 2, 3, 5$ 这几组数据来综合分析出现误码的原因。从图 3 可以看出,此时波面 R_{RMS} 值分布在 $0.04\lambda \sim 0.7\lambda$ 之间,而当 $R_{RMS} \geq 0.28\lambda$ 时系统才会出现错误判决的情况。 d_{PV} 值分布在 $0.4\lambda \sim 3.69\lambda$ 之间,只有当 $d_{PV} \geq 1.02\lambda$ 后系统才会出现错误判决。也就是说当波面畸变到一定程度后($R_{RMS} \geq 0.28\lambda, d_{PV} \geq 1.02\lambda$)就可能导致通信系统产生误码。

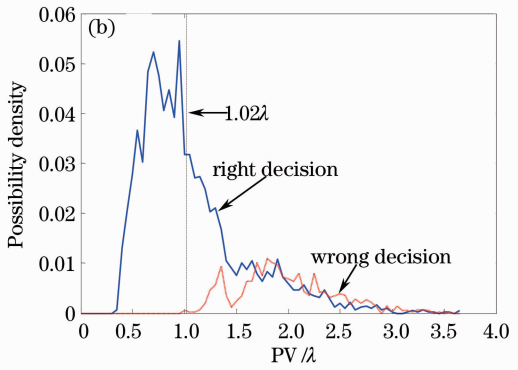
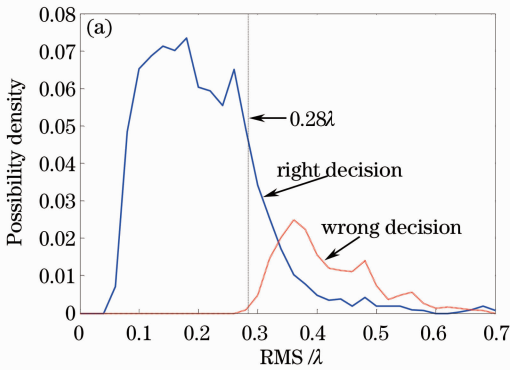


图 3 正确判决和错误判决时波面(a) RMS 和(b) PV 的概率密度分布($R_{SN} \rightarrow \infty$)

Fig. 3 PDF of wavefront (a) RMS and (b) PV at right or wrong decision ($R_{SN} \rightarrow \infty$)

接下来通过 BPSK 调制信号的星座图分析出现误码的原因以及临界点。图 4 是一组发送数字信号为“0”且对应的调制相位为“ π ”的几种情况下的星座图对比。同样不考虑整体平移对相位的影响,并且不考虑光强闪烁的影响。理想情况下是相位都集中在 π 的位置,如图 4(a)所示。如果相位有畸变,而畸变不是很大,如图 4(b)、(c)所示,其波面的 $d_{PV} < \lambda$,同样

不会发生误判。而当相位畸变进一步增大,波面 $d_{PV} > \lambda$,如图 4(d)所示,此时就很容易使判决混淆,很难分辨出该信号的相位是“0”还是“ π ”,也就是说此时出现误判的概率很大。从这种角度分析,可以认为在无噪声($R_{SN} \rightarrow \infty$)条件下,波面 $d_{PV} > \lambda$ 时才可能会出现错误判决。这个结果与上面大气湍流随机像差仿真得到的临界值结果一致,该结论可以为波

前校正的最终目标提供重要参考。

上述结论是在 $R_{SN} \rightarrow \infty$ 时得到的,也就是仅考虑调制信号相位随机畸变对光通信 BER 的影响,而没有考虑散粒噪声、热噪声等带来 SNR 下降的问题。图 5 是 $R_{SN}=8$ 时波面 RMS 和 PV 的 PDF 图。

可以看到,此时 $R_{RMS} \geq 0.16\lambda, d_{PV} \geq 0.71\lambda$ 后就会出现错误判决。由此可以推测,在 SNR 越低的情况下,波面 RMS 和 PV 值需要校正到更小才能避免误码的出现。

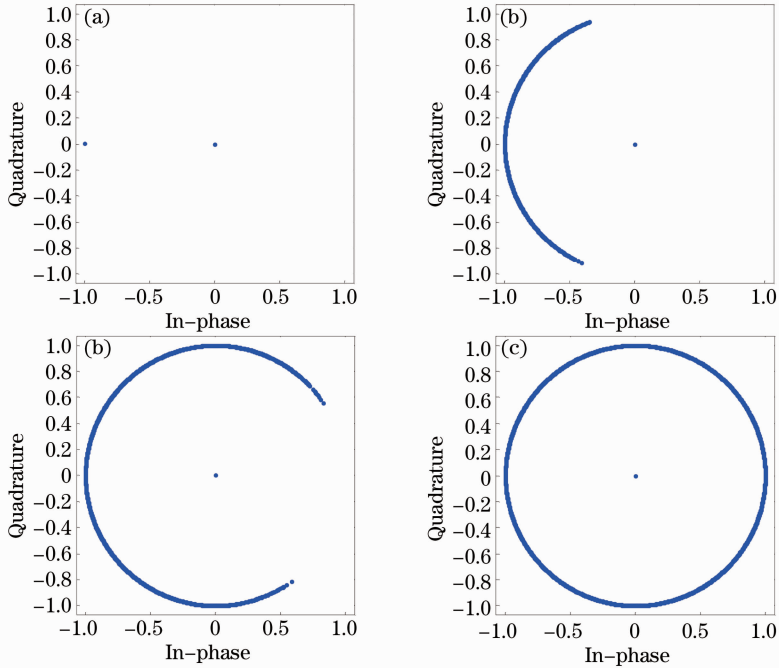


图 4 BPSK 星座图示意。(a)理想情况;(b),(c)不会发生误判的情况;(d)易发生误判的情况

Fig. 4 Schematic diagrams of BPSK constellation. (a) Ideal condition; (b), (c) impossible misjudgment conditions; (d) prone to misjudgment condition

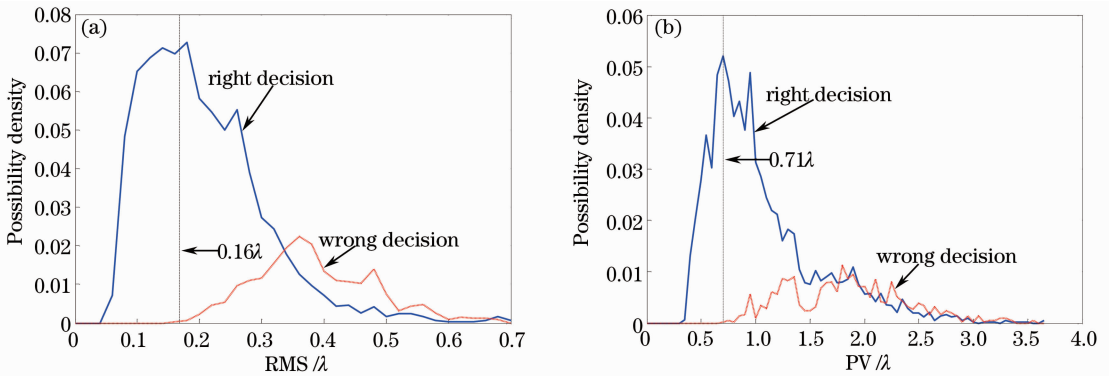


图 5 正确判决和错误判决时波面(a) RMS 和(b) PV 的概率密度分布($R_{SN}=8$)

Fig. 5 PDF of wavefront (a) RMS and (b) PV at right or wrong decisions ($R_{SN}=8$)

通过上述分析可以看到像差畸变过大可以直接导致相干光通信系统出现误码。另外,SNR 的降低也会使系统抗误码性能恶化。下面通过分析波面畸变与混频效率的关系来说明大气湍流引起的像差畸变也会导致系统 SNR 下降,从而增加系统 BER。仿真中仅考虑大气湍流造成的光强起伏和相位畸变对混频效率的影响,而没有考虑诸如天线像差、失配

角度等带来的影响。从图 6 可以看到,随着波面畸变程度的增大,混频效率逐渐减小,这就意味着在噪声功率一定的条件下,随着湍流强度的增加,系统 SNR 会急剧下降,同时也会导致系统误码增多。表 2 给出了几种波面 RMS, PV 值和混频效率之间的对应关系。当 $R_{RMS} = \lambda/10$ 时,混频效率可达到 0.65;而当 $R_{RMS} = \lambda/5$ 时,混频效率仅为 0.17。

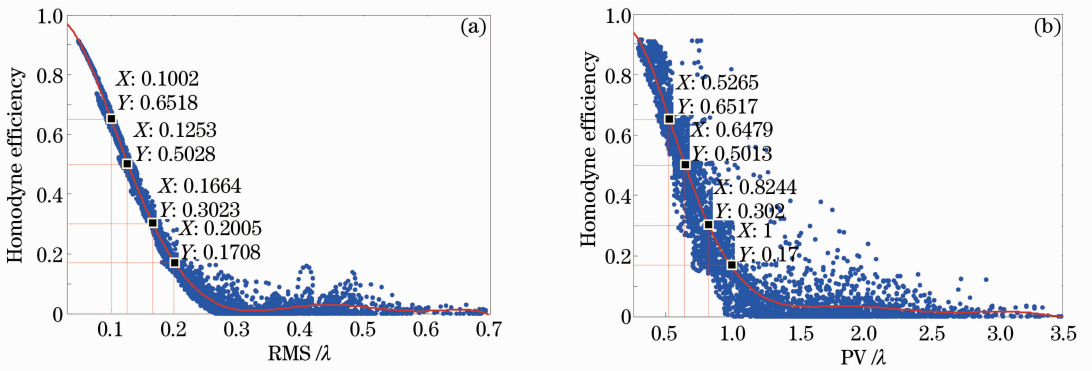


图 6 波面(a) RMS和(b) PV与零差混频效率的关系

Fig. 6 Relationship between (a) RMS and (b) PV of wavefront and homodyne mixing efficiency

表 2 波面 RMS,PV 与混频效率的对应关系示例
Table 2 Typical examples of relationship between RMS and PV of wavefront and homodyne mixing efficiency

RMS of wavefront	PV of wavefront ($d_{PV} \approx 5R_{RMS}$)	Mixing efficiency
$\lambda/10$	0.53λ	0.65
$\lambda/8$	0.65λ	0.50
$\lambda/6$	0.82λ	0.30
$\lambda/5$	1.01λ	0.17

当波面 PV 值达到一定程度后,会出现误码。同理可推,当混频效率降低到一定程度后也会出现误码。图 7 分析了正确判决和错误判决情况下混频效率的 PDF,当 R_{SN} 趋于无穷大时,混频效率小于临界值 0.16 会出现误码;当 $R_{SN} = 8$ 时,混频效率小于临界值 0.27 就会出现误码。同样计算 $R_{SN} = 6$ 时, $R_{RMS} \geq 0.07\lambda$, $d_{PV} \geq 0.38\lambda$,混频效率小于 0.76 就可能出现误码。由此可以推断,如果 SNR 进一步降低,对混频效率的要求会更高。因此,在相干光通信系统中校正波前畸变,提高相干混频效率变得非常重要。

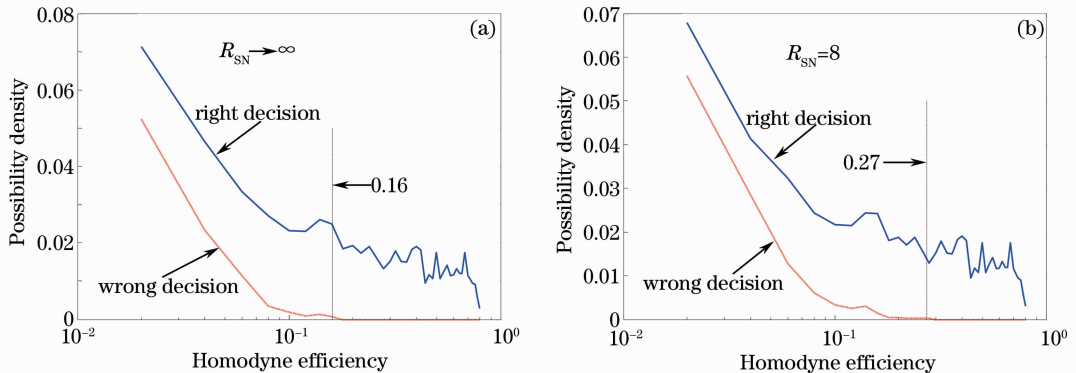


图 7 正确判决和错误判决情况下混频效率的 PDF

Fig. 7 PDF of mixing efficiency at right and wrong decisions

4 结 论

对空间零差 BPSK 光通信系统进行建模,包括调制发射、湍流大气传输、相干探测和解调三个部分。通过蒙特卡罗方法仿真不同大气湍流条件下的 BER 来说明大气湍流引起的波前畸变给 BPSK 相干光通信系统带来的恶劣影响。结果表明,大气湍流引起的像差可以独立于系统 SNR 作用于相干光通信系统,导致 BER 出现。即使在 SNR 比较高的情况下(包括 SNR 趋于无穷大),湍流引起的像差畸变过大也会使通信系统出现较高的 BER。另外,大

气湍流引起的光强起伏和相位畸变会破坏信号光与本振光空间相位和振幅的匹配条件,导致相干混频效率急剧下降,降低系统 SNR,从而增加系统 BER。同时,通过仿真和分析星座图指出,在 SNR 无限大的情况下,当接收光信号的波面 PV 大于一个波长后,就容易出现误码,并且随着 SNR 的降低,波面 RMS 和 PV 值需要校正到更小才能避免误码的出现。因此为了保证相干光通信系统有较好的抗误码性能,一般需要寻找比较好的大气条件,或是利用波前校正技术把波面畸变的 PV 值控制在一个波长以

内甚至更小。目前,自适应光学技术是对付大气湍流的最佳方案之一。并且在前期的工作中已经说明利用自适应光学技术把波前畸变量控制在一个波长范围以内是完全可以实现的^[11~13]。关于自适应光学技术在相干 BPSK 中的具体应用将在今后的研究工作中详细阐述。

参 考 文 献

- 1 L. G. Kazovsky, G. Kalogerakis, W. T. Shaw. Homodyne phase-shift-keying systems: past challenges and future opportunities [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4876~4884
- 2 F. Heine, H. Kämpfner, R. Czichy *et al.*. Optical inter-satellite communication operational [C]. 2010 Military Communications Conference, 2010. 1583~1587
- 3 M. Gregory, F. Heine, H. Kämpfner *et al.*. Inter-satellite and satellite-ground laser communication links based on homodyne BPSK [C]. *SPIE*, 2010, **7587**: 75870E
- 4 R. A. Fields, D. A. Kozlowski, H. T. Yura *et al.*. 5.625 Gb/s bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an optical ground station [C]. *SPIE*, 2011, **8184**: 81840D
- 5 A. Belmonte. Influence of atmospheric phase compensation on optical heterodyne power measurements [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6756~6763
- 6 A. Belmonte, J. M. Kahn. Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14151~14162
- 7 Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Liu Liren. Effect of aberration on

- performance of the bit-error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0106002
- 刘宏展, 纪越峰, 刘立人. 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0106002
- 8 Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 14~19
 - 张慧敏, 李新阳. 大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(1): 14~19
 - 9 L. G. Kazovesky. Decision-driven phase-locked loop for optical homodyne receivers: performance analysis and laser linewidth requirements [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(6): 1238~1247
 - 10 M. J. Fice, A. Chiuchiarelli, E. Ciaramella *et al.*. Homodyne coherent optical receiver using an optical injection phase-lock loop [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(8): 1152~1164
 - 11 Yunyun Wu, Yu Zhang, Hongwei Ye *et al.*. Simulation and experiment of adaptive optics in 2.5 Gbps atmospheric laser communication [C]. 2012 International Conference on Computer Science and Information Processing, 2012. 278~282
 - 12 Wu Yunyun, Chen Erhu, Zhang Yu *et al.*. Experiment on adaptive optics to improve the performance of FSO [J]. *Optical communication Technology*, 2012, **36**(4): 15~18
 - 武云云, 陈二虎, 张宇等. 自适应光学技术提高 FSO 性能的实验验证[J]. *光通信技术*, 2012, **36**(4): 15~18
 - 13 Wu Yunyun, Chen Erhu, Zhang Yu *et al.*. Simulation and experiment of adaptive optics in atmospheric laser communication [J]. *Optical communication Technology*, 2012, **36**(8): 52~55
 - 武云云, 陈二虎, 张宇等. 自适应光学技术在光通信中的仿真与实验分析[J]. *光通信技术*, 2012, **36**(8): 52~55

栏目编辑: 王晓琰