

大气湍流对空间相干光通信的影响研究

孔英秀^{1,2} 柯熙政¹ 杨媛¹

¹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 光外差探测效率不仅与大气湍流有关,还与信号光及本振光在探测器光敏面上的分布特性有关。对不同光场分布下大气湍流对外差效率的影响进行了分析对比,讨论了湍流影响下外差效率随探测器半径的变化关系。结果表明:当信号光和本振光为 Airy+Gauss 模型时,大气湍流对外差效率的影响最小,且外差效率达到最大值后不随探测器半径的增大而变化;Airy+平面波模型受湍流的影响最大,即使在弱湍流下外差效率下降也十分迅速,最大可下降 95.13%。

关键词 光通信; 大气湍流; 外差效率; 光场分布; 空间相干光通信; 外差探测

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080601

Influence Research of Atmospheric Turbulence on Space Coherent Optical Communications

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

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

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

Abstract The efficiency of optical heterodyne detection is not only related to the atmospheric turbulence, but also related to the optical field distribution of the signal light and the local optical on the detector photosensitive surface. The influences of the atmospheric turbulence on that are studied when the signal light and the local optical field distributions are not the same, the change of the heterodyne efficiency along with the radius is discussed. The conclusion shows that when signal and local optical field are Airy+Gauss model, the influence of turbulence on the heterodyne efficiency is minimum, and will not change along with the detector radius after the efficiency is maximum. The influence of the turbulence is biggest under the Airy+Plane wave model, even under the weak turbulence, the heterodyne efficiency falls very quickly, and the maximum value of the drop rate is 95.13%.

Key words optical communications; atmospheric turbulence; heterodyne efficiency; optical field distribution; space coherent optical communications; heterodyne detection

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.1660; 030.1640; 010.1330

1 引言

空间相干光通信能够很好地抑制背景噪声,提高接收机的探测灵敏度,实现对微弱光信号的探测,近年来已成为空间光通信领域的研究热点^[1-2]。空间相干光通信在接收端的探测方式有两种:零差探测和外差探测。零差探测要求本振光与信号光的相位严格匹配,技术实现上比外差探测更困难,因此,相干光通信在接收端一般采用外差探测方式^[3]。

大气湍流效应严重影响了空间相干光通信的可靠性和稳定性,降低了外差探测系统的检测灵敏度^[4-6],增加了接收信号的误码率^[7]。文献[8]研究了 Airy+Gauss 分布模型的外差效率,给出了获得最大外差效率时高斯光束的光腰半径和位置。文献[9]研究了 Airy+Gauss 分布模型时空间失配角和波面曲率半径对外差效

收稿日期: 2015-03-01; 收到修改稿日期: 2015-04-01; 网络出版日期: 2015-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61377080)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、西安市科技成果转化基金(CX12165)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划(2013JK1104)、陕西省工业攻关科技计划(2013K06-08)、江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)(BE2013088)

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

率的影响,证明空间失配角对外差效率的影响大于波面曲率半径的影响。文献[10]研究了探测器光敏面上不同光场分布模型对外差效率的影响,结果表明 Airy+Airy 分布和 Gauss+Gauss 分布模型理论上可达到 100% 的外差效率。文献[8-10]的研究结果未考虑大气湍流对外差效率的影响,文献[11]研究了大气湍流对外差效率的影响,但忽略了本振光场分布模型不同时大气湍流对外差效率影响的差异。实际中探测器表面接收到信号光场和本振光分布有差异时,湍流对外差效率的影响也不同。因此,本文在探测器表面接收到信号光场和本振光场分布模型不同时,对湍流对外差效率的影响进行了对比研究,并对湍流影响下不同光场分布模型的外差效率进行了数值模拟。

2 相干通信的外差效率

空间相干光通信外差探测原理如图 1 所示,图中 SMF 为单模光纤,DSP 为数字信号处理器, ω_s 和 ω_l 分别为信号光和本振光的角频率。

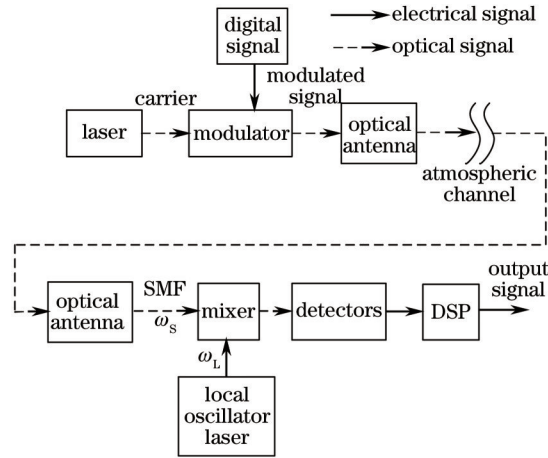


图 1 空间相干光通信外差探测原理

Fig.1 Principle of heterodyne detection for space coherent optical communication

假设信号光和本振光具有相同的偏振方向,且都垂直照射到探测器的光敏面上,则探测器光敏面上任意一点 (x,y) 处信号光和本振光的光场复振幅随时间 t 的变化关系分别为

$$E_{s_0}(x,y,t) = A_{s_0}(x,y)\exp[i(\omega_{s_0}t + \varphi_{s_0})], \quad (1)$$

$$E_{l_1}(x,y,t) = A_{l_1}(x,y)\exp[i(\omega_{l_1}t + \varphi_{l_1})], \quad (2)$$

式中 A_{s_0} 和 A_{l_1} 、 ω_{s_0} 和 ω_{l_1} 、 φ_{s_0} 和 φ_{l_1} 分别为信号光和本振光的振幅、角频率和初相位。两束光在探测器光敏面上进行相干混频,假设探测器光敏面对入射光均匀响应,且响应带宽有限,输出光电流与入射光场的平方成正比,则探测器输出的均方中频光电流为各面积元 dA 所产生光电流在探测器光敏面上的积分并取振幅平方的一半,表达式可写为

$$\langle i_{IF}^2 \rangle = \frac{\beta^2}{2Z_0^2} \left| \iint_D E_{l_1} \cdot E_{s_0}^* dA \right|^2, \quad (3)$$

式中 $\beta = e\eta/h\nu$, 为探测器的响应度,其中 e 为电子电荷, η 为探测器的量子转换效率, h 为普朗克常数, ν 为光波频率, Z_0 为自由空间的阻抗, D 为探测器光敏面面积, E_{s_0} 为信号光光场。

外差探测中本振光功率远大于信号光功率,因此,由本振光引起的散粒噪声为主要噪声来源,则探测器输出的均方噪声电流为

$$\langle i_N^2 \rangle = 2e i_{l_1} \Delta f_{IF} = \frac{e\beta\Delta f_{IF}}{Z_0} \left| \iint_D E_{l_1} \cdot E_{l_1}^* dA \right|^2. \quad (4)$$

由(3)式和(4)式得中频滤波器输出的信噪比为

$$R_{SN} = \frac{\eta}{2Z_0 h\nu \Delta f_{IF}} \frac{\left| \iint_D E_{l_1} \cdot E_{s_0}^* dA \right|^2}{\left| \iint_D E_{l_1} \cdot E_{l_1}^* dA \right|^2}, \quad (5)$$

信号光的功率为

$$P_s = \frac{1}{2Z_0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E_{s0} \cdot E_{s0}^* dA. \quad (6)$$

利用(6)式,可将(5)式改写为

$$R_{SN} = \frac{\eta P_s}{2h\nu \Delta f_{IF}} \frac{\left| \int_D E_L \cdot E_{s0}^* dA \right|^2}{\int_D E_L \cdot E_L^* dA \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E_{s0} \cdot E_{s0}^* dA}, \quad (7)$$

令

$$\eta_h = \frac{\left| \int_D E_L \cdot E_{s0}^* dA \right|^2}{\int_D E_L \cdot E_L^* dA \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E_{s0} \cdot E_{s0}^* dA}, \quad (8)$$

通常式(8)称为外差效率^[12],是入射信号光电场与有效本振光电场之间匹配程度的一种度量,反映了接收信号光信噪比的大小。

3 大气湍流对外差效率的影响

(8)式为信号光通过理想大气介质时得到的外差效率表达式,实际中,当激光通过湍流大气时,由于大气折射率不均匀,传输光程会发生时间和空间上的变化,从而产生波前相位畸变。当探测器接收到带有波前相位畸变的信号光与本振光进行相干混频时,信号光和本振光不能保持空间上的角准直,从而导致外差效率下降,引起外差探测信噪比降低。

(8)式忽略了湍流大气造成的波前畸变对外差效率的影响,认为接收到的信号光与本振光在探测器光敏面上每一点的相位延时是相同的,它对输出光电流的影响只是在相位上附加了一固定的相位差。实际光信号经过湍流大气传输时,波前每一点的相位延迟都不同,从而会给外差探测带来附加的相位差。因此,通过湍流大气传输后信号光的光场表达式可写为

$$E_s(x, y, t) = A_s(x, y) \exp[i(\omega_s t + \varphi_s)] = E_{s0}(x, y, t) \exp(\Phi), \quad (9)$$

式中 A_s 、 ω_s 和 φ_s 分别为信号光通过湍流大气后的振幅、角频率和初相位, Φ 为湍流引起的振幅波动和波前相位畸变的联合表达式。将(1)式代入(9)式并两边取自然对数得^[13]

$$\Phi = \ln \frac{A_s(x, y)}{A_{s0}(x, y)} + i[\phi_s - \phi_{s0}] = \chi + iS. \quad (10)$$

式中 χ 为对数光强变化, S 为波前相位畸变。将(10)式代入(9)式得

$$E_s = A_{s0}(x, y) \exp[i(\omega_{s0} t + \varphi_{s0})] \exp(\chi + iS). \quad (11)$$

将(11)式代入(6)式和(8)式得

$$P_s = \frac{1}{2Z_0} \int_D E_s \cdot E_s^* dA = \frac{1}{2Z_0} \int_D A_{s0}^2 \exp(2\chi) dA, \quad (12)$$

$$\eta_h = \frac{\left| \int_D A_L \cdot A_s \exp(-iS) dA \right|^2}{\int_D A_L^2 dA \int_D A_s^2 dA}. \quad (13)$$

由(12)式和(13)式可得,外差探测的信噪比和外差效率都受到大气湍流的影响。研究表明,信号光经过远距离传输到达接收端时的光场分布为平面波^[14],湍流大气引起的空间相位起伏由 Komogorov 统计理论来描述,二维空间矢径 ρ 处于湍流内尺度与外尺度之间时,平面波的相位起伏可表示为^[15]

$$S = 2.914 C_n^2 L k^2 \rho^{5/3}, \quad (14)$$

式中 C_n^2 为大气折射率结构常数, L 为传输距离, k 为波数。假设经过孔径衍射后湍流尺度内的光全部被光电探测器所接收,将(14)式代入(13)式,可得湍流大气造成波前相位畸变时的外差效率为

$$\eta_h = \frac{\left| \iint_D A_L \cdot A_s \exp[-i(2.914C_n^2 Lk^2 \rho^{5/3})] dA \right|^2}{\iint_D A_L^2 dA \iint_D A_s^2 dA} \quad (15)$$

4 不同光场分布模型下湍流对外差效率的影响

空间相干光通信系统接收到的信号光通常为平面波,经过圆孔衍射到探测器光敏面上的光场分布模型为 Airy 分布,如图 2 所示。其光场表达式为

$$E_s(r, \theta) = \left[\frac{J_1(X_s)}{X_s} \right] \exp(ikz + iS), \quad (16)$$

式中 $X_s = \pi r / \lambda_s F$, r 为探测器光敏面半径, λ_s 为信号光波长, $F = f/2d$, 为孔径数, d 为透镜的有效孔径直径, f 为透镜焦距, J_1 为一阶贝塞尔函数。

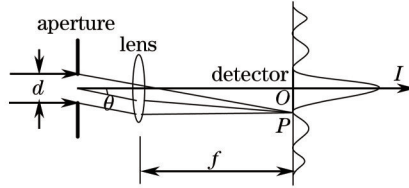


图 2 孔径衍射 Airy 分布图

Fig.2 Airy pattern of aperture diffraction

当本振光光场分布为 Gauss 分布、Airy 斑分布、平面波分布时,光场表达式分别为

$$E_l(r, \theta) = \exp(-Q_0^2 + ikz), \quad (17)$$

$$E_l(r, \theta) = J_1(X_l) / X_l, \quad (18)$$

$$E_l(r, \theta) = 1, \quad (19)$$

式中 $X_l = \pi r / \lambda_l F$, $Q_0^2 = -r^2 / \omega_0^2$, λ_l 为信号光波长, ω_0 为高斯光束的腰斑半径。

由(13)、(16)、(17)、(18)、(19)式得本振光光场分布不同时,大气湍流对外差效率的影响,其表达式分别为

$$\eta_{A-G} = \frac{\left| \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \exp(-Q_0^2) \left[\frac{J_1(X_s)}{X_s} \right] \exp(-i2.914C_n^2 Lk^2 \rho^{5/3}) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \exp(-2Q_0^2) r dr d\theta \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \left[\frac{J_1(X_s)}{X_s} \right]^2 r dr d\theta}, \quad (20)$$

$$\eta_{A-A} = \frac{\left| \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \frac{J_1(X_l)}{X_l} \cdot \frac{J_1(X_s)}{X_s} \exp(-i2.914C_n^2 Lk^2 \rho^{5/3}) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \left[\frac{J_1(X_l)}{X_l} \right]^2 r dr d\theta \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \left[\frac{J_1(X_s)}{X_s} \right]^2 r dr d\theta}, \quad (21)$$

$$\eta_{A-P} = \frac{\left| \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \frac{J_1(X_s)}{X_s} \exp(-i2.914C_n^2 Lk^2 \rho^{5/3}) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} r dr d\theta \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \left[\frac{J_1(X_s)}{X_s} \right]^2 r dr d\theta}, \quad (22)$$

式中 η_{A-G} 为信号光和本振光光场分布为 Airy+Gauss 的外差效率, η_{A-A} 为信号光和本振光光场分布为 Airy+Airy 的外差效率, η_{A-P} 为信号光本振光光场分布为 Airy+平面波的外差效率, r_0 为探测器半径。

5 不同本振光场分布下湍流对外差效率的影响

5.1 理想条件下的外差效率

考虑信号光为 Airy 分布情形,本振光分别为 Airy 分布、Gauss 分布和平面波分布情形,光波波长 $\lambda_s = \lambda_l = 1550 \text{ nm}$,探测器的半径 $r \leq 10 \mu\text{m}$,孔径数 $F = 2$,高斯光束的腰斑半径 $\omega_0 = 1.6\lambda_l$ 。不考虑大气湍流的影响,信号光和本振光在探测器光敏面上相干混频的分布如图 3 所示,不同本振光场分布下的外差效率

如图4所示^[10],图中 X 为探测器的等效半径,其数值等于 $\pi r/\lambda F$, $\lambda = \lambda_s = \lambda_L$ 为光波波长。

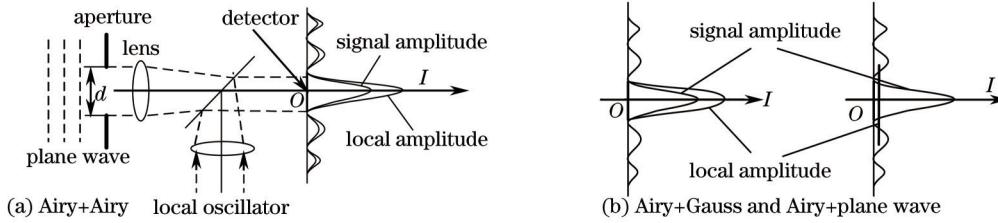


图3 探测器光敏面上信号光及本振光分布

Fig.3 Signal and local optical distributions on detector photosensitive surface

图4 是信号光和本振光为 Airy+Airy 分布时的外差效率, $X = \pi r/\lambda F$ 。两束光的振幅可完全匹配,外差效率随探测器半径的增大而增大,在 Airy 斑的第一暗条纹处 $\eta_{A-A} = 0.8352$,第二暗条纹处为 0.9078,当探测器足够大时,外差效率可达到 1。当信号光和本振光为 Airy+Gauss 分布时,外差效率在第一暗条纹内,随探测器半径的增大而线性增大,可达到 Airy+Airy 分布时的外差效率,最大值为 $\eta_{A-G} = 0.8145$,而后随着探测器半径增大时,外差效率略微降低后基本保持不变。对于 Airy+平面波分布,随着探测器的增大,外差效率先是线性增大到最大值,约为 $\eta_{A-P} = 0.7165$,随后随着探测器半径的继续增大,外差效率下降,当 $X < 6$ 以后,外差效率下降到 0.1 以下。

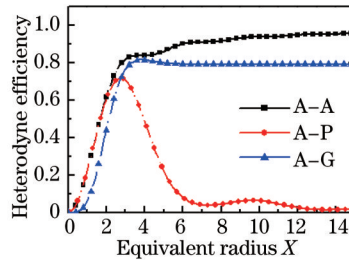


图4 信号光为 Airy 本振光分别为 Airy、Gauss、平面波时的外差效率

Fig.4 Heterodyne efficiency for an Airy function signal and the Airy, Gauss or plane wave distributions of the local oscillator wave

5.2 湍流条件下的外差效率

实际中信号光在空间传输时,受到大气湍流的影响,外差效率不可能达到图4所示的数值。假设光学元件参数和激光光束参数同5.1节,当传输距离 $L = 1000$ m,湍流强度 C_n^2 分别为 $1.7 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 、 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 等值时,对不同本振光场分布下,湍流对外差效率的影响进行了仿真分析,目的是为以后进行空间光通信实验打下坚实的理论基础。图5给出了信号光和本振光为 Airy+Airy 分布时大气湍流对外差效率的影响。

由图5可见,在弱湍流条件下,第一暗条纹处的外差效率 $\eta_{A-A} \approx 0.3669$,第二暗条纹处的效率下降到 $\eta_{A-A} \approx 0.6414$,比无湍流时外差效率下降了 29.35%~56.29%。尽管在湍流很弱时的外差效率随着探测半径的增大而增加,但随着湍流强度的增加这种优势会明显减弱,且湍流越强,外差效率越低。当 $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,外差效率下降到 0.2 以下,相比于无湍流时外差效率下降了 76.05%,且探测器半径 $X > 3.5$ 以后,外差效率不随探测器半径的增大而变化。

图6为信号光和本振光为 Airy+Gauss 分布时的外差效率。与图4相比较可以看出,湍流较弱时外差效

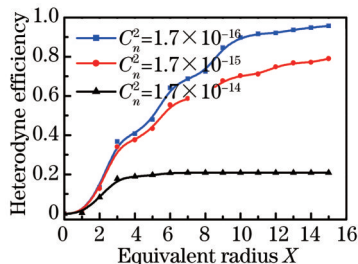


图5 Airy+Airy 分布的外差效率

Fig.5 Heterodyne efficiency of Airy+Airy distribution

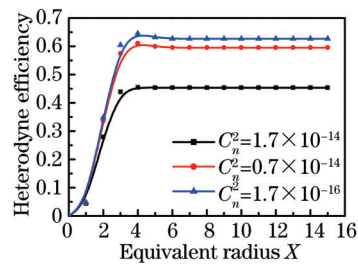


图6 Airy+Gauss 分布的外差效率

Fig.6 Heterodyne efficiency of Airy+Gauss distribution

率最大值为 0.6266, 相比于无湍流时的最大值 0.8145, 湍流引起的外差效率下降了 23.07% 左右。可见弱湍流引起的外差效率下降较为缓慢, 随着湍流强度的增加, 外差效率下降增强, 但相比 Airy+Airy 分布模型, 外差效率下降较缓。中湍流时的外差效率为 0.4533, 相比于无湍流时外差效率下降了 44.35%, 且当 $X > 3.8$ 以后, 外差效率不随探测器半径的增大而变化。相比于 Airy+Airy 分布模型, Airy+Gauss 分布模型抗湍流效应更强。

图 7 为 Airy+平面波分布时的外差效率, 可以看出外差效率随探测器半径的增大呈震荡衰减趋势, 探测器半径较小时, 中湍流和弱湍流区湍流引起的外差效率变化相同, 最大值下降到 0.0349, 相比于无湍流时的外差效率, 最大值下降了 95.13%, 探测器几乎探测不到外差信号。随着探测器半径的增大, 中湍流对外差效率的影响慢慢大于弱湍流的影响, 只是变化较为缓慢。

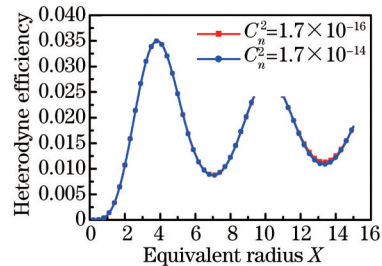


图 7 Airy+平面波分布的外差效率

Fig.7 Heterodyne efficiency of Airy+plane wave distribution

6 结 论

研究了大气湍流对相干光通信不同光场分布下的外差效率的影响, 结果表明: 1) 弱湍流下, 信号光和本振光为 Airy+Airy 分布模型时, 外差效率下降约为 29.35%~56.29%, 尽管在湍流很弱时外差效率随着探测半径的增大而增加, 但随着湍流强度的增加这种优势明显减弱, 且湍流越强, 外差效率越低, 受探测器半径的影响越小, 中湍流时外差效率下降更大, 达到了 76.05%; 2) Airy+Gauss 分布模型时, 外差效率受大气湍流的影响最小, 相比于无湍流时, 外差效率下降了 23.07% 左右, 随着湍流强度的增加, 外差效率下降, 但下降的幅度较小, 中湍流时下降了 44.35%, 但此时的外差效率比 Airy+Airy 分布模型的外差效率高出了 41.7%; 3) Airy+平面波分布模型受大气湍流的影响最大, 即使在弱湍流下, 外差效率最大值也下降十分迅速, 达到 95.13%, 中湍流对外差效率的影响与弱湍流近似相等, 但随着探测器半径的增大, 震荡衰减趋势缓慢加强。Airy+Gauss 分布模型抗湍流效应最好, Airy+平面波分布模型受大气湍流的影响最为严重。因此, 在进行外差探测的实验研究时, 要合理选择本振光场的分布模式, 同时, 要对大气湍流引起的畸变波前进行修正, 使探测器光敏面接收到的光波前相位差尽可能相同, 从而使两束光相干混频的外差效率达到最大, 进而提高外差探测的信噪比。

参 考 文 献

- 1 Vismara F, Grkovic V, Musumeci F, *et al.*. On the energy efficiency of IP-over-WDM networks[C]. IEEE Latin-American Conference, 2010: 1-6.
- 2 Kazovsky L G, Kalogerakis G. Modern coherent optical communications[C]. Lasers and Electro-optical, 2006 and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2005: 1-2.
- 3 Kikuchi K. Coherent transmission systems[C]. European Conference on Optical Communication, 2008: 1-39.
- 4 Xie Mengqi, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the signal-to-noise ratio of free space optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 150(11): 110102.
解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 110102.
- 5 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Reserch of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706017.

- 6 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, HouPeipei, *et al.*. Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 120002.
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 120002.
- 7 Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulence aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0606002.
武云云, 李新阳, 饶长辉. 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[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0606002.
- 8 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, *et al.*. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 889-892.
马宗峰, 张春熹, 张朝阳, 等. 光学外差探测信噪比研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 889-892.
- 9 Wang Qi, Wang Chunhui, Shang Tieliang. Heterodyne efficiency of coherent detection with Gaussian local oscillator and Airy spot signal beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(s1): 183-186.
王 骐, 王春晖, 尚铁梁. 高斯本振光和爱里斑信号光相干探测的外差效率[J]. *中国激光*, 2003, 30(s1): 183-186.
- 10 Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan, *et al.*. Effect of amplitude profile difference if signal an local oscillator wave on heterodyne efficiency in the inter-satellite coherent optical communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1006001.
刘宏展, 纪越峰, 许 楠, 等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1006001.
- 11 Wang Enhong, Hu Yihua, Li Lei, *et al.*. Influence analysis of atmosphere on heterodyne detection lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1896-1899.
王恩宏, 胡以华, 李 磊, 等. 大气对外差探测激光雷达影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1896-1899.
- 12 Wang Qingzheng, Hu Yu, Lin Chongjie. *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.
- 13 Xiaoming Zhu, Joseph M Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Trans Communications*, 2002, 50(8): 1293-1300.
- 14 Zhao Changzheng, Jiao Binliang, Chen Wenxin. Effect of light collimation on heterodyne efficiency for space coherent optical communication[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(3): 406-413.
赵长政, 焦斌亮, 陈文新. 光束准直性对星间相干光通信外差效率的影响[J]. *半导体光电*, 2007, 28(3): 406-413.
- 15 Rao Ruizhong. *The Light Transmission in Turbulent Atmosphere*[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 2005.
饶瑞中. *光在湍流大气中的传输*[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.

栏目编辑: 史 敏