

doi:10.3788/gzxb20154408.0806003

大气湍流下带有跟踪误差的空间相干光通信性能分析

南航^{a,b}, 张鹏^{a,b}, 佟首峰^{a,b}, 陈纯毅^{a,c}

(长春理工大学 a. 光电工程学院; b. 空间光电技术国家与地方联合工程中心;
c. 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

摘 要:在星地链路的空间相干光通信系统中,大气湍流、跟踪误差会影响系统的混频效率和误码率.根据混频效率公式分别推导了大气湍流强度和跟踪误差与系统混频效率的关系并进行仿真计算.计算结果表明,混频效率随跟踪误差和大气湍流强度的增加而降低,其中当跟踪误差大于 $12 \mu\text{rad}$ 或湍流强度超过 10^{-16} 时,混频效率趋近零.建立了大气湍流下带跟踪误差的光混频效率及误码率的数学模型,并计算了不同情况下的混频效率.在跟踪误差小于 $2 \mu\text{rad}$ 时大气湍流是混频效率的主要影响因素,当跟踪误差继续增大时跟踪误差起主导作用.根据传统相干光通信系统参量取值估算得最大混频效率约为 67.8%,当误码率为 10^{-9} 时系统接收灵敏度为 17 photon/bit.

关键词:空间相干光通信;混频效率;跟踪误差;大气湍流;误码率

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)08-0806003-6

Performance Analysis of Free Space Coherent Optical Communication in Atmosphere Turbulence with Tracking Error

NAN Hang^{a,b}, ZHANG Peng^{a,b}, TONG Shou-feng^{a,b}, CHEN Chun-yi^{a,c}

(a. College of Opto-Electronic Engineering; b. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology; c. Key Laboratory of Education Ministry Optoelectronic Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In the free space coherent optical communication system of satellite-ground link, atmosphere turbulence and tracking error will affect the mixing efficiency and the bit error rate. According to the mixing efficiency formula, both the relationship between system mixing efficiency and atmosphere turbulence intensity and the relationship between system mixing efficiency and tracking error were derived and simulated. The results show that the mixing efficiency will decrease with the increasing of tracking error and atmosphere turbulence intensity. When the tracking error is greater than $12 \mu\text{rad}$ or turbulence intensity exceeds 10^{-16} , the mixing efficiency is close to 0. An optical mixing efficiency model and a bit error rate model were built in atmosphere turbulence with tracking error, and the homodyne efficiency with different conditions was calculated. Atmosphere is the significant factor of mixing efficiency when tracking error is less than $2 \mu\text{rad}$. Then, the tracking error will be as the leading factor with it increasing. According to the reference values of traditional coherent communication system, the maximum of mixing efficiency is about 67.8%, and the system receiving sensitivity is 17 photon/bit when the error rate is 10^{-9} .

Key words: Free space coherent optical communication; Tracking error; Atmosphere turbulence; Mixing efficiency; Bit error rate

OCIS Codes: 060.2605, 010.1290, 060.1660, 060.2920, 060.4510

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(No. 91438204)资助

第一作者:南航(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为相干光通信及空间光混频技术. Email: sirsam@163.com

导师(通讯作者):佟首峰(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为航天遥感,卫星激光通信. Email: tsf1998@sina.com

收稿日期:2015-01-28;录用日期:2015-04-27

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

自由空间激光通信 (Free Space Optical Communication, FSO) 相对于传统的微波通信系统具有很多优势, 光波自身的高频率带来的高调制带宽能够传输更高速率的信息, 且具有很高的安全性和抗干扰的能力^[1], 适用于远距离高速率点对点的通信链路. 星地链路是空间相干激光通信重要链路之一, 自由空间相干光通信因其高速率高灵敏度的优势成为了解决卫星对地通信速率的重要手段.

自由空间相干光通信系统的研究近年来得到迅速发展, 其中空间光混频器的研究尤为突出. 刘宏展等分析了振幅分布对混频效率的影响^[2]; 么周石等指出跟瞄误差会使信号光与本振光产生相位失配, 从而降低混频效率^[3]; 向劲松等的研究表明接收天线的倾斜、离焦、球差、彗差和像散等像差将导致混频效率的降低^[4]; 刘超等研究了主动光学对混频效率的影响^[5]; Shlomi Arnon 等研究了卫星振动对星间相干光通信混频效率的影响^[6]; 王朝晖等研究了振动引起的接收天线瞄准角误差会使混频效率发生变化^[7]; Kazumasa Tanaka 等研究了光轴倾斜和偏移以及背景辐射对混频效率的影响^[8-9]; Ren 等研究了传输信道对混频效率的影响. 现有文献大多分析了振幅、振动、像差及跟瞄误差等对光混频效率的影响, 而有关大气湍流对光混频器影响的研究较少, 特别是综合多种影响因素的分析.

本文建立跟踪误差和大气湍流强度与混频效率的数学仿真模型, 并对其分析, 得到混频效率与跟踪误差和大气湍流强度的关系曲线和误码率 (Bit Error Rate, BER) 曲线. 进一步得到不同条件下两个因素影响系统混频效率的权重, 以及相干光通信系统在实际条件下的最大混频效率.

1 相干光通信系统的混频效率

相干光通信系统是利用接收信号光与本地激光器发出的与信号光具有相同状态的本振光混频来实现信号强度的放大, 具体方式如图 1. 接收的光信号与本振光的电场分别为

$$E_s = A_s \exp[-i(\omega_s t + \varphi_s)] \quad (1)$$

$$E_{L0} = A_{L0} \exp[-i(\omega_{L0} t + \varphi_{L0})] \quad (2)$$

式中 A_s 与 A_{L0} 分别为信号光与本振光的振幅; ω_s 与 ω_{L0} 为信号光与本振光的角频率; φ_s 与 φ_{L0} 为信号光与本振光的固有相位. 两束光在光混频器中进行混频, 混频光电场为^[10]

$$E_{co} = (E_s + E_{L0}) \cdot (E_s + E_{L0})^* \quad (3)$$

光电探测器输出的平均光电流为

$$\langle i \rangle^2 = \frac{1}{2} (2RK)^2 \left\{ \left[\int_U A_s A_{L0} \cos(\Delta\varphi) dU \right]^2 + \right.$$

$$\left. \left[\int_U A_s A_{L0} \sin(\Delta\varphi) dU \right]^2 \right\} \quad (4)$$

式中 K 为光电探测器的比例系数, R 为光电探测器的响应速率; $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_{L0}$ 为混频光的相差. 为获得理想的系统灵敏度, 总相差需小于 2° ^[11]. 在相干光通信系统中, 本振光功率远远大于接收到的信号光功率, 量级相差约 10^6 , 因此本振光产生的散粒噪声为接收机内部噪声的主要来源. 接收机内部的平均噪声电流为

$$\langle i_N \rangle^2 = 2eI_{L0}B \quad (5)$$

式中 B 为数据带宽; I_{L0} 为本振光电流. 将 I_{L0} 展开, 式 (5) 改写为

$$\langle i_N \rangle^2 = 2eBRK \int_U A_{L0}^2 dU \quad (6)$$

信号光强度 $P_s = K \int_U A_s^2 dU$. 则相干光通信系统的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 为

$$\text{SNR} = \frac{\langle i \rangle^2}{\langle i_N \rangle^2} = \frac{\eta P_s}{h\nu B} \cdot \frac{\left| \int_U A_s A_{L0} \exp(i\Delta\varphi) dU \right|^2}{\int_U |A_s|^2 dU \cdot \int_U |A_{L0}|^2 dU} \quad (7)$$

式中 $\text{SNR}_0 = \eta P_s / h\nu B$ 为散粒噪声极限时系统的信噪比^[12]. 则系统混频效率为

$$\eta_{co} = \frac{\left| \int_U A_s A_{L0} \exp(i\Delta\varphi) dU \right|^2}{\int_U |A_s|^2 dU \cdot \int_U |A_{L0}|^2 dU} \quad (8)$$

式 (7) 可简化为

$$\text{SNR} = \text{SNR}_0 \cdot \eta_{co} \quad (9)$$

由式 (9) 可知实际系统的信噪比为散粒噪声极限时的信噪比与混频效率的乘积, 因为系统中存在误差, 即 η_{co} 小于 1, 则 $\text{SNR} < \text{SNR}_0$, 由于混频效率的存在, 系统实际信噪比永远小于理想信噪比.

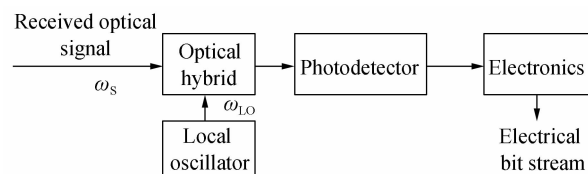


图 1 相干探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coherent detection

2 光场模式匹配对混频效率的影响

在空间相干光通信系统中, 因为传输距离非常遥远, 因此信号光在光学天线前表面可认为是平面波, 光场模式可近似认为是均匀分布. 信号光经过光学透镜组入射到探测器, 在探测器前表面呈现艾利分布. 本振光为接收机自带光源, 光场模式大致可以分为艾利分布、均匀分布、高斯分布, 不同模式会直接影响混频后两光束的光场模式匹配, 改变系统混频效率.

假设信号光与本振光振幅、相位分布相同, 光场几

何中心重合,探测器孔径为圆形^[2].根据文献[2]给出的简化混频效率公式,可得到三种模式分布下混频效率与探测器半径之间的关系曲线,如图3.本振光为艾利分布时系统的极限混频效率最高,在 $R=9.2\ \mu\text{m}$ 处 η 约为93.5%.本振光模式变换为艾利分布需要使用模式匹配系统,会增加系统的复杂性且不利于接收机的轻小型化.当本振光为均匀分布时,混频效率在探测器半径 $R=2.7\ \mu\text{m}$ 时达到峰值,约为71.7%,随着探测器半径的继续增大,混频效率开始快速下降,在均匀分布模式下探测器半径持续增大会引入更多的噪音,导致混频效率严重恶化.当本振光为高斯分布时,混频效率在探测器半径 $R=3.4\ \mu\text{m}$ 时达到最大值,约为83.4%,随着 R 的增大 η 可以稳定维持在80%左右.实际应用中,本振光光场模式分布选择高斯分布可使系统在小探测半径下获得较高的混频效率,稳定性也更好.本文研究选择信号光光场模式分布为艾利分布,本振光光场模式分布为高斯分布.

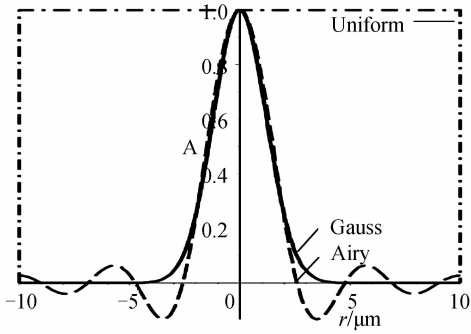


图2 本振光的三种光场模式分布图

Fig. 2 Distribution of three patterns of local oscillator light

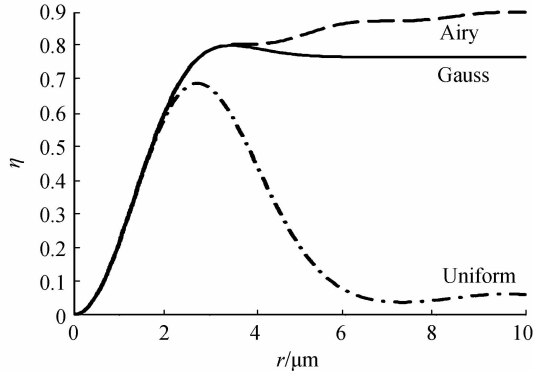


图3 三种光场模式下混频效率与探测器半径的关系

Fig. 3 Mixing efficiency for detector radius with three ways to optical field pattern match

3 APT跟踪误差对混频效率的影响

在星地激光通信链路中,由于跟踪捕获对准系统(Acquisition Pointing Tracking, APT)存在一个小角度(单位为 μrad)的动态对准误差^[13-14],导致信号光与本振光的波前出现一个角偏差,在相干孔径处混频光场中两束光的相位匹配度降低,导致混频效率下降.同时

光波前的失配也会导致系统混频效率和输出信噪比下降,对通信链路的性能也有不利的影响^[15-16]. APT系统的跟踪误差使信号光的相位产生变化,因此重新定义信号光的电场为

$$E_s = A_s \exp[-i(\omega_s t + \varphi_s + \varphi_{\text{APT}})] \quad (10)$$

式中, φ_{APT} 为 APT 系统对信号光带来的附加相位量, φ_{APT} 的变化由 APT 系统的视轴误差角量 θ 表示,单位为 μrad .对应的混频效率公式为

$$\eta_{\infty} = \frac{\left| \int_U A_s A_{\text{LO}} \exp[i(\Delta\varphi + \varphi_{\text{APT}})] dU \right|^2}{\int_U |A_s|^2 dU \cdot \int_U |A_{\text{LO}}|^2 dU} \quad (11)$$

发射端发出的信号光经过通信信道由接收机接收,在此过程中存在不同的损耗,假设只有对准误差,则接收到的信号功率^[5]为 $P_s = P_t \cdot L_t \cdot L_r$, L_t 为发射机的对准误差, L_r 为接收机的对准误差.由于发射端的对准误差只改变接收端信号光的光强,因此通信链路性能主要受到接收机部分的对准误差影响.接收端的对准误差使信号光与本振光出现动态的一阶波前失配,导致系统混频效率降低.在混频效率的计算中使用极坐标法.附加相位量可以用接收机的视轴误差角 θ_r 表示.假设接收到的信号光与本振光的初始相位差为0,即 $\Delta\varphi=0$.则混频效率表示为

$$\eta_{\infty} = \left\{ \left| \int_0^{2\pi} \int_0^R A_s A_{\text{LO}} \exp[i(\theta_{rx} r \cos \theta + \theta_{ry} r \sin \theta)] r^2 dr d\theta \right|^2 \right\} / \left[\int_0^{2\pi} \int_0^R |A_s|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R |A_{\text{LO}}|^2 r dr d\theta \right] \quad (12)$$

式中 R 为探测器半径,设 $\alpha = \arctan(\theta_{rx}/\theta_{ry})$ 则式(12)可改写为

$$\eta_{\infty} = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^R A_s A_{\text{LO}} \exp[i\theta_r \sin(\alpha + \theta)] r^2 dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^R |A_s|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R |A_{\text{LO}}|^2 r dr d\theta} \cdot \frac{2J_1(\pi D \theta_r / F \lambda)}{(\pi D \theta_r / F \lambda)} \quad (13)$$

式中 D 为光学天线直径.假设光探测器与单模光纤直径相同,因此设定探测器直径为 $9\ \mu\text{m}$,光学天线直径 $D=150\ \text{mm}$,光波长 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$,则混频效率随视轴误差角 θ_r 变化的曲线如图4.

如图4可知,当不存在视轴误差角时系统混频效率为0.804,当 θ_r 增大到 $2\ \mu\text{rad}$ 时,混频效率下降了0.036,在此区间混频效率随视轴误差角的增大而缓慢下降;当 θ_r 增大到 $6\ \mu\text{rad}$ 时,混频效率下降了0.255,混频效率随视轴误差角的增大快速下降,当 θ_r 为 $12.63\ \mu\text{rad}$ 时,混频效率为0.可知相干光通信系统对跟踪误差较为敏感,设计时应保证 APT 系统的视轴误差角小于 $2\ \mu\text{rad}$.

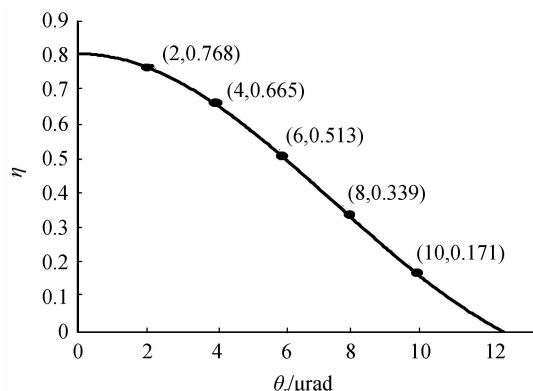


图4 混频效率 η 与视轴误差角 θ_r 的关系曲线
Fig. 4 The relationship curve between mixing efficiency η and Optical axis error Angle θ_r

4 大气湍流对混频效率的影响

星地激光通信链路中,大气湍流是影响相干光通信系统性能的重要因素之一.大气湍流主要影响信号光与本振光的空间相位差异^[17].导致系统混频效率发生变化,重新定义信号光光场为

$$E_s = A_s \exp[-i(\omega_s t + \varphi_s + \varphi_{AT})] \quad (14)$$

式中 φ_{AT} 为信号光经过大气湍流后产生的附加相位量.

根据 von Karman 湍流谱可知大气湍流与信号光的附加相位量之间的关系为

$$\langle \varphi_{AT}^2 \rangle = 0.782 L k^2 C_n^2 L_0^{5/3} \quad (15)$$

式中 L 为传播距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, C_n^2 为大气湍流折射率常量, L_0 为湍流外尺度, $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均.

假设信号光与本振光的初始相位相同,则存在大气湍流影响因子的系统混频效率公式为

$$\eta_{\infty} = \frac{8}{\omega_0^2} \cdot \frac{\left| \int_0^{r_0} J_1(X) \exp(-Q^2) dr \right|^2}{1 - \exp(-2Q_0^2)} \cdot \left| \exp(i\varphi_{AT}) \right|^2 \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)中得到混频效率 η 与大气湍流强度 C_n^2 的关系式

$$\eta_{\infty} = \frac{8}{\omega_0^2} \cdot \frac{\left| \int_0^{r_0} J_1(X) \exp(-Q^2) dr \right|^2}{1 - \exp(-2Q_0^2)} \cdot \left| \exp(i\sqrt{0.782 L k^2 C_n^2 L_0^{5/3}}) \right|^2 \quad (17)$$

设定传输距离 $L = 1000$ m,湍流外尺度 $L_0 = 1$ m,研究不同湍流强度下混频效率与探测器直径之间的关系.选取三组 C_n^2 数据分别为 3×10^{-18} 、 3×10^{-15} 、 3×10^{-12} 对应由弱到强三种强度的湍流,相干光通信系统的混频效率与探测器直径之间的关系如图5.湍流强度的增强导致系统混频效率峰值降低,当探测器半径小于 $5 \mu\text{m}$ 时,混频效率随探测器半径增大而升高;探测器半径继续增大,系统混频效率趋于稳定,不再随探测器半径的增大而升高.由此可知增大探测器半径对

于大气湍流的补偿有限.当 $C_n^2 = 3 \times 10^{-18}$ 时,系统混频效率最大值为 47.1% , $C_n^2 = 3 \times 10^{-15}$ 时,系统混频效率最大值约为 6×10^{-11} , $C_n^2 = 3 \times 10^{-12}$ 时,系统混频效率最大值约为 2.28×10^{-79} .根据三组数据可知,相干光通信系统在弱湍流条件下可以有效传输,在中湍流或强湍流条件下混频效率很低,性能不佳.设定探测器半径为 $4.5 \mu\text{m}$,根据式(17)得到混频效率 η 与大气折射率常量 C_n^2 的关系曲线,如图6. C_n^2 小于 10^{-16} 时,混频效率随大气湍流强度的增强而下降,当 C_n^2 超过 10^{-16} 时,混频效率趋近0,可知相干光通信系统在不使用大气湍流补偿技术时可以在大气湍流强度小于 10^{-16} 的条件下有效传输.另外根据图6可知相干光通信对大气湍流的变化十分敏感,大气湍流会干扰星地链路下的空间相干光通信的正常工作.因此,星地链路相干光通信系统中地面站常选择大气活动较为平缓的地区,同时使用大气湍流补偿技术进行补偿.研究表明,利用主动光学技术,对光束的空间相位进行控制和调整,可以极大改善相干光通信系统在大气条件下的混频效率.在中湍流情况下可以使系统混频效率维持在0.6左右,在强湍流下混频效率可维持在0.3左右^[4].

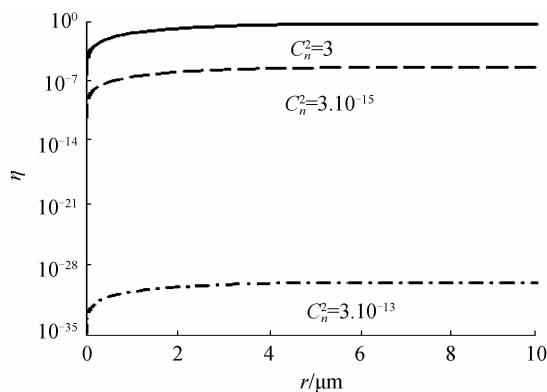


图5 三种湍流强度下混频效率与探测器半径的关系曲线
Fig. 5 The relationship curve between mixing efficiency and detector radius with three turbulence intensities

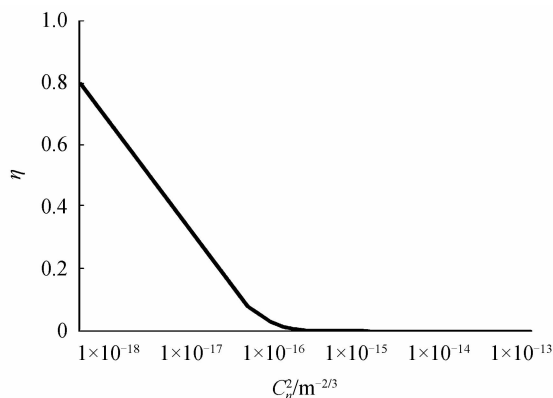


图6 系统混频效率与大气折射率常量的关系曲线
Fig. 6 The relationship curve between mixing efficiency and atmospheric refraction constant

5 复杂条件下相干光通信系统中混频效率和误码率的变化

根据空间相干光通信在星地链路中的实际应用,

$$\eta_{co} = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{2J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \exp[i\theta_r \sin(\alpha + \theta)] r^2 dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \left| \frac{2J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda}} \right|^2 r dr d\theta \int_0^{2\pi} \int_0^R \left| \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \right|^2 r dr d\theta} \cdot \frac{2J_1\left(\frac{\pi D\theta_r}{\lambda}\right)}{\frac{\pi D\theta_r}{\lambda}} \cdot \left| \exp\left(i\sqrt{0.782Lk^2 C_n^2 L_0^{5/3}}\right) \right|^2 \quad (18)$$

选取五组跟踪误差,分别为 $0 \mu\text{rad}$ 、 $2 \mu\text{rad}$ 、 $4 \mu\text{rad}$ 、 $6 \mu\text{rad}$ 、 $8 \mu\text{rad}$,得到五组带有固定跟踪误差时大气湍流强度与系统混频效率的关系曲线,如图 7. 随着跟踪误差的增大,根据图 7 中关系曲线可知相干光通信系统混频效率 η 随大气湍流折射率结构常量 C_n^2 的增大线性下降,因为相干光通信系统中强湍流下混频效率极低,所以只分析弱湍流下大气湍流强度与跟踪误差对系统混频效率的关系. 当系统跟踪误差小于 $2 \mu\text{rad}$ 时,系统混频效率对于跟踪误差的变化不敏感,跟踪误差对混频效率的影响较小,大气湍流强度为系统混频效率的主要影响因素;当跟踪误差大于 $2 \mu\text{rad}$,混频效率随跟踪误差的增大而快速下降,由于曲线斜率变小,大气湍流对混频效率的影响减小,跟踪误差的影响加大,逐渐成为系统混频效率的主要影响因素. 由于大气湍流强度属于不可控的随机态,相干光通信系统在大气湍流下运行会对系统跟踪准确度提出更高的要求.

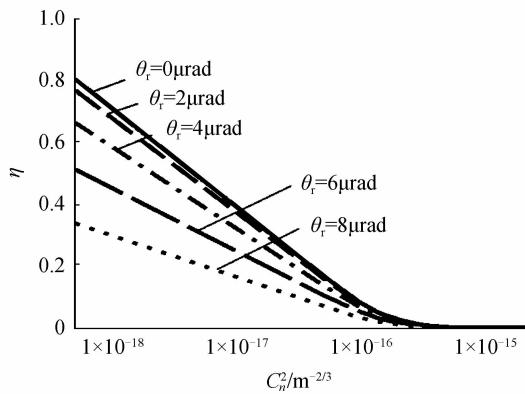


图 7 不同跟踪误差下大气湍流强度与系统混频效率的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve between mixing efficiency and atmospheric refractive constant which contains four ways of tracking error

接收机的误码率(BER)也是衡量相干光通信系统性能的重要参量^[18-19],BER的表达式为

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{2\eta N_p \eta_{co}}\right) \quad (19)$$

综合考虑 APT 跟踪误差与大气湍流引起的空间相位分布偏差对系统混频效率的影响,结合式(13)与式(17)得到大气湍流下带跟踪误差的空间相干光通信的混频效率

式中 N_p 为接收机灵敏度单位为 photon/bit, η 为量子效率.

模拟实际使用环境,在弱湍流情况下,大气湍流折射率常量 $C_n^2 = 3 \times 10^{-19}$,不使用大气湍流补偿技术,跟踪误差 θ_r 为 $2 \mu\text{rad}$ 时,根据式(18)计算出接收机的最大混频效率为 67.8%. 通过空间相干光通信传输 1550 nm 波段的光信号,探测器直径为 $9 \mu\text{m}$,根据式(18)计算出接收机的最大混频效率为 67.8%. 将结果代入式(19)得到理想与实际系统的误码率 BER 与接收灵敏度 N_p 之间的关系曲线,如图 8.

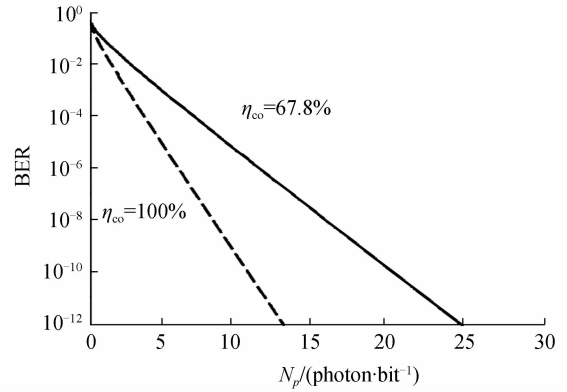


图 8 理想与实际系统误码率与接收灵敏度 N_p 的关系曲线
Fig. 8 The relationship curve between BER and receiver sensitivity in ideal and actual system

由图 8 可知,相干光通信系统误码率随 N_p 的增加而降低,理论极限系统误码率 BER 达到 10^{-9} 时接收机灵敏度为 9 photon/bit;实际系统 BER 达到 10^{-9} 时接收机灵敏度约为 17 photon/bit. 根据误码率的变化趋势可知相干光通信系统的探测灵敏度随着大气湍流和 APT 跟踪误差的增大而降低. 由于跟踪误差所在范围对混频效率影响较小,可知实际系统中大气湍流强度对系统探测灵敏度影响较大.

6 结论

在星地链路的空间相干光通信系统中,混频效率 η 为系统中的关键指标,是优化系统参量的重要依据.

APT跟踪误差和大气湍流强度是影响混频效率的两个关键因素。研究表明,APT跟踪误差不应超过 $2\mu\text{rad}$;通信系统在弱湍流条件下可以有效传输信号,混频效率随湍流强度增大而恶化;地面站应选择大气较为平稳的区域;在中强湍流下进行空间相干光通信需要使用主动光学等技术对大气湍流进行补偿。根据带跟踪误差在大气湍流下系统混频效率与大气湍流仿真计算结果可知,在跟踪误差小于 $2\mu\text{rad}$ 时混频效率对大气湍流的变化更加敏感,当跟踪误差进一步加大时跟踪误差对系统混频效率的影响会超过大气湍流。选择 $\theta_r=2\mu\text{rad}$, $C_n^2=3\times 10^{-19}$ 作为模拟条件进行空间相干光通信系统混频效率的仿真,得到系统最大混频效率为67.8%,对应系统误码率BER达到 10^{-9} ,系统探测灵敏度约为17 photon/bit。

参考文献

- [1] ZHANG Yang, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng, *et al.* Establishment of space light mixer mathematical model based on the space coherent laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0706024.
郑阳,姜会林,佟首峰,等.基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立[J].*光学学报*,2013,**33**(7): 0706024.
- [2] LIU Hong-zhan, JI Yue-feng, XU Nan, *et al.* Effect of amplitude profile difference of signal and 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.
- [3] YAO Zhou-shi, DENG Ke, LI Xiao-feng. The effect of pointing error on performance of satellite coherent laser communication link[J]. *Journal of Optoelectronics*, 2010, **21**(6): 868-870.
么周石,邓科,李晓峰.卫星相干光通信跟踪误差对链路性能的影响[J].*光电子·激光*,2010,**21**(6):868-870.
- [4] XIANG Jing-song, PAN Le-chun. 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.
- [5] LIU Chao, CHEN Shan-qiu, LI Xin-yang, *et al.* Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 15554-15563.
- [6] SHLOMI A, STANLEY R, NORMAN S, *et al.* Performance limitations of a free-space optical communication satellite network owing to vibrations; heterodyne detection[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(27): 6366-6374.
- [7] WANG Zhao-hui, ZHAO Chang-zheng, CHEN Wen-xin, *et al.* Effect of vibration on intersatellite coherent laser communication[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(3): 336-339.
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): 336-339.
- [8] KAZUMASA T, NAOYUKI O. Effects of tilt and offset of signal field on heterodyne efficiency[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(4): 627-632.
- [9] KAZUMASA T, NOBUHIRO S. Maximum heterodyne efficiency of optical heterodyne detection in the presence of background radiation[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(21): 3901-3904.
- [10] DAVID F. Coherent detection signal-to-noise[J]. *Applied Optics*, 1975, **14**(3): 689-690.
- [11] ZHANG Peng, QIN Kai-yu, HUANG Jian, *et al.* Influences of hybrid phase-shift error on the performance of optical coherent receivers[J]. *Optics Communications*, 2015, **01**(044): 113-119.
- [12] TAKASHI T, KAZUMASA T, OTOZO F. Signal-to-noise ratio in optical heterodyne detection for Gaussian fields[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(21): 3466-3471.
- [13] WANG Jian-min, QIN Yi, XU Quan, *et al.* Study on the measurement of tracking and pointing accuracy used for the terminals of free space laser communication[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, **19**(8): 1054-1059.
王建民,秦谊,徐泉,等.卫星激光通信端机跟踪准确度测试技术研究[J].*光电子·激光*,2008,**19**(8):1054-1059.
- [14] CAO Yang, AI Yong, LI Ming, *et al.* Ground simulation experiment of fine tracking for spatial optical communication[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(1): 40-43.
曹阳,艾勇,黎明,等.空间光通信精跟踪系统地面模拟实验[J].*光电子·激光*,2009,**20**(1):40-43.
- [15] ROBERT L, BERRY S. Homodyne BPSK-based optical inter-satellite communication links[C]. SPIE, 2007, **6457**: 645703.
- [16] ROBERT L, BERRY S. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation: heritage, status and outlook[C]. SPIE, 2005, **5712**: 1-12.
- [17] REN Yong-xiong, DANG An-hong, LIU Ling, *et al.* Heterodyne efficiency of a coherent free-space optical communication model through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(30): 7246-7254.
- [18] TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin, ZHANG Li-zhong. 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.
- [19] HAN Cheng, BAI Bao-xing, YANG Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 89-94.
韩成,白宝兴,杨华民,等.空地激光通信跟踪准确度主要外界影响因素研究[J].*光子学报*,2010,**39**(1): 89-94.
- [20] HUANG Yin-bo, WEI He-li, MEI Hai-ping, *et al.* Effects of atmospheric channel on system performance of infrared laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 646-651.
黄印博,魏合理,梅海平,等.大气信道对红外激光通信系统性能影响的实验研究[J].*光子学报*,2009,**38**(3): 646-651.
- [21] YU Lin-tao, SONG Lu, HAN Chen, *et al.* Analysis and simulation of link power and communication performance in space-ground optical communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 543-547.
于林韬,宋路,韩成,等.空地激光通信链路功率与通信性能分析与仿真[J].*光子学报*,2013,**42**(5): 543-547.