

文章编号: 2095-4980(2013)04-0588-03

反射镜面形畸变对相干激光通信的影响

周义建¹, 张磊¹, 张月²

(1.空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077; 2.电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要: 研究了相干激光通信系统中由反射镜面形畸变造成的信号光波前畸变, 进而分析了信号光和相干光波前失配引起的相干效率下降以及误码率的上升。仿真结果表明, 反射镜面形的峰谷值对通信链路性能影响较大; 相比而言, 畸变的大小对于链路性能影响有限。

关键词: 相干激光通信; 反射镜面形; 相干效率

中图分类号: TN929.1; E963 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201304.0588

Effect of surface shape distortion of mirror on coherent laser communication

ZHOU Yi-Jian¹, ZHANG Lei¹, ZHANG Yue²

(1.Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China;

2.Institute of Physics and Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: The single laser wave front aberration caused by reflection mirror in the coherent laser communication is studied. The wave front mismatch caused by the signal to local oscillator field coherence in coherent laser communication systems is analyzed. The simulation result shows that the Peak to Valley(PV) is the main factor which causes the performance decline of laser communication system, while the size of reflection mirror aberration influences the system insignificantly.

Key words: coherent laser communication; surface shape of mirror; coherent efficiency

在相干光通信中, 由于采用了相干探测, 本振光场与信号光场相干后大大提高了探测器光敏面上的光信号功率^[1], 从而获得较高的中频输出信噪比。但是, 在实际应用的相干光链路中, 光路内有很多反射镜(精跟踪, 卡塞格伦天线等)。由于加工、装调等原因, 反射镜自身的面形并非理想平面^[2-4], 而是存在一定的高低起伏。这样经过反射镜反射的相干通信光的相位将受到一定影响, 从而, 接收端本振信号与通信信号之间的相位差也会随之改变^[5], 使得相干孔径处的光场匹配不理想, 从而降低相干效率, 影响以误码率为表征的链路性能^[6]。本文结合 BPSK 调制/零差相干激光通信系统, 就反射镜面形对信号光和本振光的波前失配问题, 对相干激光通信链路性能进行分析。

1 理论分析

信号光场和本振光场可以表示为^[7-8]:

$$E_s(r, \theta) = A_s \cos[w_s t + \varphi_s + \Delta\varphi(r, \theta)] \quad (1)$$

$$E_{LO} = A_{LO} \cos[w_{LO} t + \varphi_{LO}] \quad (2)$$

式中: A_s, w_s 和 φ_s 为信号光的振幅、角频率及调制相位值; $\Delta\varphi(r, \theta)$ 为极坐标表示下的信号光波前受到镜面面形影响后的附加相位; A_{LO}, w_{LO} 和 φ_{LO} 分别为本振光的振幅、角频率及锁相相位值。假设附加相位服从椭圆高斯分布, 在出射光的相干平面上呈二维分布。

$$\Delta\varphi(x, y) = \psi \exp\left[-\left(\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2}\right)\right] - \psi / e \quad (3)$$

$$\psi = \frac{2\pi h_{PV}}{\lambda} \frac{e}{e-1} \quad (4)$$

式中: a 和 b 分别为反射镜瑕疵位置 x 方向和 y 方向的长度; (x_0, y_0) 为瑕疵中心坐标; ψ 为椭圆高斯函数的中心幅值; h_{pv} 为面形畸变处峰谷值(通常在镜面畸变中包含有凸起畸变和凹陷畸变, 每个畸变位置的最高点和最低点之差被定义为峰谷值)。椭圆高斯函数 $\Delta\varphi(x, y)$ 在面形畸变区域上的均方根值为:

$$\delta_{rms} = \sqrt{\frac{\iint_S \Delta\varphi^2(x, y) dx dy}{\iint_S dx dy}} = \frac{4\pi h_{pv}}{\lambda} \sqrt{\frac{e+1}{2(e-1)}} \quad (5)$$

式中 S 表示畸变区域。定义相干接收效率 η_c 为总的平均相干光功率与平均本振光功率和探测功率的比值。

$$\eta_c = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^R A_s(r, \theta) A_{LO}(r, \theta) e^{-j[\varphi_{OPLL} + \Delta\varphi(x, y)]} r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^R A_s^2(r, \theta) r dr d\theta \times \int_0^{2\pi} \int_0^R A_{LO}^2(r, \theta) r dr d\theta} \quad (6)$$

式中: 积分区间是半径为 R 的探测器光敏面, 其中, $\varphi_{OPLL} = \varphi_{LO} - \varphi_s$ 为锁相环的锁相误差。发射平面上的畸变高斯光束可以表示为:

$$E(r, \theta) = C \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2} - \frac{x^2 + y^2}{2F_0}\right] \exp[-j\Delta\varphi(r, \theta)] \quad (7)$$

式中: C 为常数; ω_0 为高斯光束的束腰半径; F_0 为光束在发射平面上的曲率半径。则在接收平面上的光场可以表示为:

$$U(x_0, y_0) = B \iint_S E(x, y) \exp\left[-\frac{jk}{z_f}(xx_0 + yy_0)\right] dx dy_0 \quad (8)$$

式中: B 为常数; z_f 为相干链路的距离。探测器接收焦平面上光强为:

$$P_S = \iint_S U(x_0, y_0) U^*(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad (9)$$

在零差 BPSK 平衡探测接收机中, 存在波前失配的条件下, 光电平衡探测器输出的中频信号电流为:

$$i_{PD} = 2R\sqrt{P_{LO} \cdot P_S} \cdot \eta_c \cos(\varphi_{OPLL}) \quad (10)$$

在 t 时刻, 采样检测电路的输入为:

$$d(t) = i_{PD} a(t) + n(t) = 2R\sqrt{P_{LO} P_S} \eta_c \cos(\varphi_{OPLL}) a(t) + n(t) \quad (11)$$

式中: $a(t)$ 为归一化通过高斯滤波器的采样值, $n(t)$ 为噪声值。文献[9]给出了零差 BPSK 最差条件误码率为:

$$P = \int_0^{\infty} f_d[d(t)] \Big|_0 dd(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} \int_{-\pi}^{\pi} Q\left(\frac{2R\sqrt{P_{LO} P_S} \eta_c \cos(\varphi_{OPLL}) a(t)}{\delta_{rms}}\right) \times \exp\left(-\frac{\varphi_{OPLL}^2}{2\sigma_\varphi^2}\right) d\varphi_{OPLL} \quad (12)$$

式中: 锁相误差 φ_{OPLL} 服从方差为 σ_φ^2 的高斯分布, 在本文中主要研究的是反射镜面形畸变引起的波前失配对通信链路的影响, 故这里假设锁相误差趋近于 0, 方差为一小值。对相干激光通信链路中反射镜面形畸变引起相干效率下降、链路性能劣化进行仿真计算。

2 仿真分析

利用 Matlab 仿真软件对畸变条件下的相干效率进行仿真, 图 1 给出了反射镜畸变条件下的相干接收效率仿真。仿真分析了峰谷值从 $1/20\lambda$ 到 $1/52\lambda$ 之间变化, 畸变半径从 1×10^5 到 12×10^5 范围内变化的情况。为了方便仿真, 设畸变长轴与短轴的关系为 $a=2b$, 仿真不同长轴下的反射镜畸变大小对接收效率的影响。从图中可以看出, 不考虑大气湍流、指向偏差角等因素的影响, 仅从反射镜面形一个方面对波前相位产生的改变来看, 相干接收效率的主要影响因素是畸变中心峰谷值的变化, 较大的峰谷值下接收端波前失配比较严重。而对于畸变大小而言, 相对影响较小。特别当畸变中心峰谷值较大时, 不同的畸变大小对接收效率的影响趋近相同。

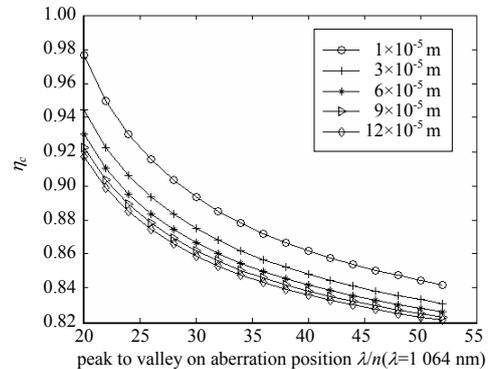


Fig.1 Coherent receiving efficiency under aberration condition
图 1 反射镜畸变条件下的相干接收效率

图 2 给出了反射镜面形畸变情况下,不同畸变中心峰谷值对误码率的影响。从图中可以看出,当畸变中心位置峰谷值较小时,不同大小的畸变带来的误码率普遍较小。随着畸变的长轴半径的增加,误码率在较大的畸变峰谷值下显著增加。而对于小峰谷值的畸变而言,畸变半径带来的误码率上升是有限的。

3 结论

在自由空间相干激光通信系统的设计和装调中,应重点注意反射镜的加工和安装。选择反射镜时,在相同的条件下应该优先选择畸变峰谷值小的反射镜,而后再进一步要求反射镜的畸变半径更小。本论文从理论分析入手,分析了相干激光通信系统中反射镜面形对于通信效率的影响。理论计算和仿真结果对于实际系统的设计和装调有一定的指导意义。

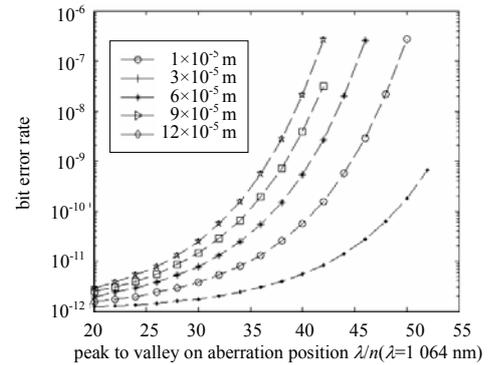


Fig.2 Bit error rate under aberration condition
图 2 反射镜畸变条件下的误码率

参考文献:

- [1] 幺周石,邓科,李晓峰. 卫星相干光通信跟瞄误差对链路性能的影响[J]. 光电子激光, 2010,21(6):868-870. (YAO Zhoushi,DENG Ke,LI Xiaofeng. The effect of pointing error on performance of satellite coherent laser communication link[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010,21(6):868-870.)
- [2] 夏利军,李晓峰. 基于自适应光学的大气光通信波前校正实验[J]. 信息与电子工程, 2010,8(3):331-335. (XIA Lijun,LI Xiaofeng. Transmission Wave-front correction of atmospheric optical communication based on adaptive optics technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(3):331-335.)
- [3] 沈世东,余俊,潘俊鹤,等. 一种离轴凸双曲面单修加工及检测方法的研究[J]. 光学技术, 2011,37(6):664-668. (SHEN Shidong,YU Jun,PAN Junhe,et al. Research on unit manufacture and test of an off-axis convex hyperboloidal mirror[J]. Optical Technique, 2011,37(6):664-668.)
- [4] 李滔,徐家品. 认知信号在多径信道中频谱成形的优化方法[J]. 信息与电子工程, 2012,10(2):178-182. (LI Tao,XU Jiapin. Scheme of optimizing cognitive signal by using spectrum shaping in multipath fading communication channels[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(2):178-182.)
- [5] Berry Smutny,Robert Lange. In orbit verification of optical inter satellite communication links based on homodyne BPSK[C]// Proceedings of SPIE 6877. San Jose:SPIE, 2008,6877:687702.
- [6] Stevens M L,Caplan D O,Robinson B S,et al. Optical homo dyne PSK demonstration of 1.5 photons per bit at 156 Mbps with rate 21/2 turbo coding[J]. Optics Express, 2008,16(14):10412-10420.
- [7] Shiro Yamakawa,Akira Hirose. Coherent light wave receivers with a laser diode local oscillator for inter orbit optical communication[J]. Proceedings of SPIE, 2003,4975:69-79.
- [8] Shlomi Arnon. Power versus stabilization for laser satellite communication[J]. Applied Optics, 1999,38(15):3229-3233.
- [9] Swanson E A,Bondurant R S. Fiber-based receiver for free-space coherent optical communications systems[C]// Optical Fiber Communication Conference. Houston,Texas: Optical Society of America, 1989:6-9.

作者简介:



周义建(1974-),男,安徽省六安市人,硕士,副教授,研究方向为信息与信号处理和空间光通信,email:zl_zxx@163.com.

张磊(1985-),男,山西省汾阳市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为指挥信息系统、信号处理.

张月(1983-),男,杭州市人,博士,讲师,主要研究方向为空间光通信技术.