

# 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

马小平<sup>1,2</sup> 孙建锋<sup>1</sup> 职亚楠<sup>1</sup> 鲁伟<sup>1</sup> 刘立人<sup>1</sup> 许倩<sup>1</sup> 卢栋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信与检验技术重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在星地激光通信中, 大气湍流影响光接收波面, 增加通信误码率。采用差分相移键控(DPSK)体制, 通过当前码元信号光与延时1 bit的码元信号光干涉得到数据信息。在高码率通信的情况下, 由于大气扰动对前后码元信号光的波面影响基本相同, 可以通过干涉时波面相位相减得到差分信息。在此基础上, 用菲涅耳衍射理论, 分析入射光信号在自由空间差分干涉结构中的衍射传输过程。数值模拟仿真过程中, 模拟探测波前像差对干涉系统性能的影响, 通过对探测端零差效率的分析, 验证了自由空间差分干涉结构解调光信号可以在一定程度上克服大气湍流效应对光信号相位信息的扰动。从理论上给出了自由空间差分干涉结构解调光信号的使用条件和结论。

**关键词** 光通信; 差分相移键控; 波前像差; 相干对比度; 零差效率

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0706017

## Research of DPSK Modulation and Self-Differential Homodyne Coherent Detection Technology to Overcome Atmospheric Turbulence Effect in the Satellite-to-Ground Laser Communication

Ma Xiaoping<sup>1,2</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup> Zhi Yanan<sup>1</sup> Lu Wei<sup>1</sup> Liu Liren<sup>1</sup> Xu Qian<sup>1</sup> Lu Dong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In the satellite-to-ground laser communication, atmospheric turbulence influences the wave-front and increases bit error rate. The data information is got by an unequal arm-length interferometer based on differential phase shift key (DPSK), with the interference between the former code and the latter code of signal light. Generally, atmospheric turbulence makes the same influence on the wave-fronts of the front and rear codes in high speed rate communication, so differential information is obtained by the subtraction of the two successive wave-front phases when interference occurs. On the basis of theoretical foundation above, the diffraction propagation of incident signal light in the structure of the free-space differential interference is analyzed with Fresnel diffraction theory. In numerical simulation, the impact of detected optical wave aberrations on the performance of differential interference system is discussed. It is proved that free-space differential interference structure can overcome the disturbance of optical phase information of atmospheric turbulence effects. In addition, the applications and conclusions of optical signal demodulation with free-space differential interference structures are given.

**Key words** optical communications; differential phase shift keying; wave-front aberration; coherence ratio; homodyne efficiency

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 060.1660; 080.1010

收稿日期: 2013-02-05; 收到修改稿日期: 2013-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61275110)

作者简介: 马小平(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事星地激光通信和激光雷达等方面的研究。

E-mail: maxiaoping@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间激光通信和激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunjianfengs@163.com(通信联系人)

# 1 引 言

卫星激光通信经过近 20 年的发展,在传输码率、天线尺寸、保密性、带宽容量和能耗等多方面展现出相对于无线电通信的种种优越性,并且通信终端机有更小的体积和更轻的质量,具有良好的应用前景。自 20 世纪 80 年代以来,卫星激光通信经历了充分的理论论证和全面的地面验证<sup>[1-2]</sup>。进入 21 世纪,美国、日本、德国等国家都成功实现了在轨激光通信链路。其中,在 2001 年 11 月,欧洲航天局(ESA)实施了 SILEX 计划<sup>[3]</sup>,在高轨道通信卫星 ARTEMIS 和低轨道地面观测卫星 SPOT-4 之间成功实现了远程星际激光通信,这是世界上首次实现星际激光通信链路,通信体制采用强度调制/直接探测,适合低通信速率应用。为获得更高通信速率,德国空间中心于 2008 年在低轨卫星 TerraSAR-X 和 NFIRE 之间实现了速率为 5.6 Gb/s 的相干激光通信<sup>[4]</sup>,采用二进制相移键控(BPSK)零差调制,相干探测,提高接收灵敏度。星间激光通信已经达到实用化、商用化水平,但星地激光通信技术一直未能获得突破,是目前天地一体化激光通信网络的瓶颈。

星地激光通信面临的首要问题是星地自由空间和大气组成的混合传输信道。大气湍流不仅造成接收端强度的起伏,也会造成接收波前的严重畸变,从而大大降低接收灵敏度和探测效率。为了克服大气扰动对星地激光通信链路的影响,欧洲航天局、德国航天局(DLR)和日本情报通信研究机构(NICT)都开展了相关的理论研究和实地验证实验<sup>[5]</sup>,目前提出的设想方案有三种:1)减小接收孔径。但是这种方法由于无法充分利用孔径平均效应,不能克服光束漂移和闪烁带来的光强波动,使得功率的动态范围过大,增大误码率。目前关于减小接收口径克服大气湍流的研究进展较少。2)采用自适应光学利用可变型镜实时检测、校正接收波面,提高耦合效率。欧洲航天局和德国宇航中心开展了相关的研究工作。但是自适应光学系统需要等晕角大于通信两点的相对角度,同时增加系统复杂度,造价较高。3)采用差分相移键控(DPSK)调制<sup>[6]</sup>,不需要波前补偿技术,不需要本振光,也不需要频率锁定。加载相位信息的接收信号光通过差分结构,一路延迟后在输出端发生干涉解调信息。

本文提出一种自由空间差分干涉结构接收装置,与文献<sup>[5]</sup>中的 4f 差分干涉结构相比中,该结构紧凑简单,适合高速率通信,避免了差分支路中 4f 透镜像差对探测效率的影响。重点介绍了 DPSK

调制机理,并数值模拟了接收到的光学信号在该装置中的光学衍射传播过程和相位信息解调原理。根据同步数字通信体系(SDH)理论,在不同通信速率下,信号光束波面受不同程度大气湍流效应影响产生畸变。给出了表征湍流强度的大气折射率常数和偏光干涉端零差探测效率的变化关系以及通过自由空间差分干涉结构解调差分相位信息的使用范围及条件,从而提高探测效率、降低误码率。

## 2 差分干涉接收机结构及其原理分析

### 2.1 差分相移键控调制机理

DPSK 是一种相位调制模式,把信息加载在载波上相邻码元的相对相位变化中<sup>[7]</sup>。相邻码元的相移为 0 或  $\pi$ ,对应要传递的信息数据为 0 或 1。在接收端,两个连续码元通过非等臂的信号支路和自相位延时  $T$  信号支路进行偏光干涉,解调得到数据信息,如图 1 所示。

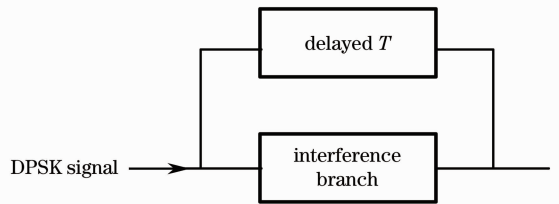


图 1 DPSK 调制信号调制机理图

Fig. 1 Diagram of self-differential interference of DPSK modulating signal

### 2.2 差分干涉接收系统装置

差分相移键控调制信号的接收机不采用光纤传输光信号,是由偏振分束器、波片和反射镜、透镜等光学器件组成的全光器件结构装置,如图 2 所示,包括接收望远镜、马赫-曾德尔(MZ)型非等臂差分干涉系统、 $2 \times 4$   $90^\circ$ 自由空间光学桥接器<sup>[8-9]</sup>、平衡光电探测器和数据处理电路。采用平衡接收机平衡探测信号,理论上探测的灵敏度比直接探测的情况高 3 dB。通过前置放大器等电路实现稳相和对数据的处理。

## 3 仿真实验模型及其原理分析

### 3.1 仿真实验模型

根据 DPSK 原理和接收机示意图要求,给出相应的实验装置图,如图 3 所示。在差分接收机中,自由空间差分干涉部分是相干解调过程中的核心技术环节。

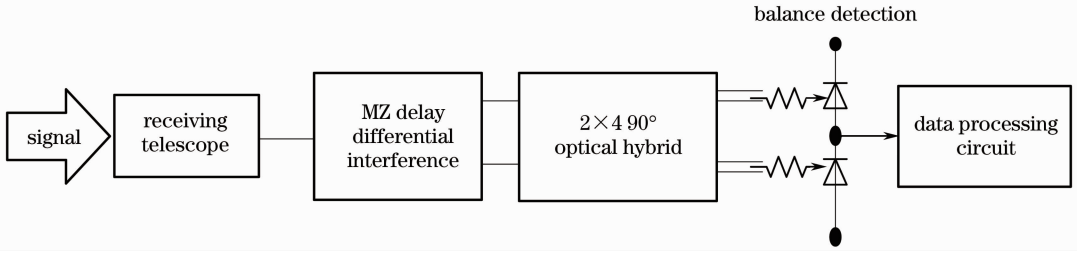


图 2 差分相移键控接收机结构示意图

Fig. 2 Diagram of basic structure of DPSK receiver

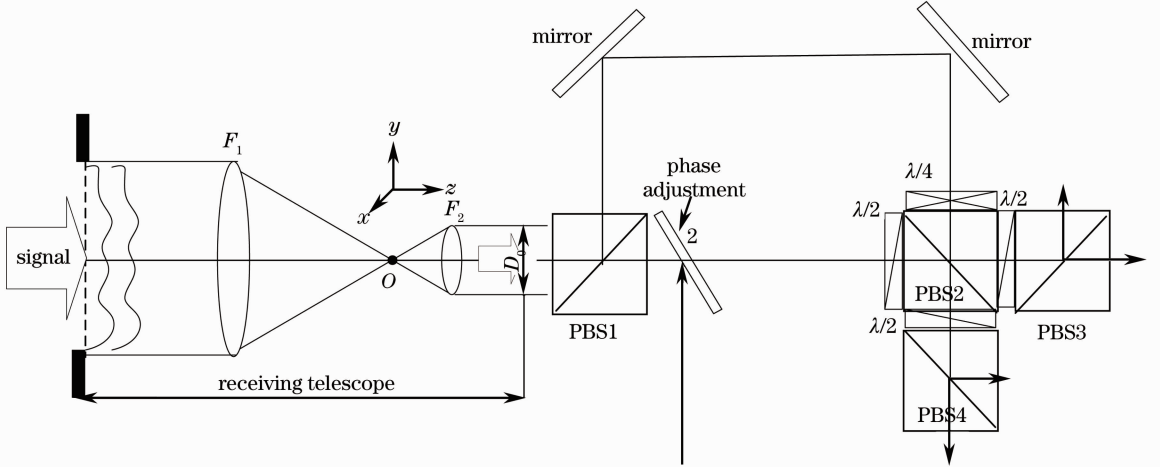


图 3 自由空间差分干涉结构装置图

Fig. 3 Diagram of free-space differential interference structure

星地激光通信中,在卫星终端上的信号发射机发出 DPSK 调制信号,经过长距离大气衍射传输,受湍流扰动影响,产生波前畸变的调制信号光进入接收机前端的接收望远镜。经过望远镜内部焦距分别为  $F_1$  和  $F_2$  的共焦透镜组,在偏振分束器(PBS1)的偏振分束面分成两束光,分别进入短臂差分支路和延迟 1 bit 周期  $T$  的长臂差分支路。差分距离由通信速率决定,而且短支路放置精密相位控制器,保证差分距离是波长的整数倍。此后两路光束分别进入  $2 \times 4 \ 90^\circ$  自由空间光学桥接器<sup>[10]</sup>两输入端,将两

束光偏振分束分成八束光,分别在 PBS3/PBS4 的偏振分束面合束偏振干涉,光电探测器探测到光功率,平衡接收机采用平衡接收原理进行数据处理,得到信息相位的正弦和余弦部分,余弦信号支路输出数据信号。

### 3.2 衍射过程原理分析

假设星上激光通信终端发射的信号光为高斯光束,经过发射端准直扩束后,再经历自由空间-大气混合信道传输,到达光学地面站接收望远镜的光场分布近似平面波,复振幅表示为

$$U_{in}(x, y, t_n) = A(x, y, t_n) \exp[jkW(x, y, t_n) + j\phi(x, y, t_n)] P_{in}(x, y), \quad (1)$$

式中  $j$  为虚数,  $k$  为激光束波数,  $P_{in}(x, y)$  为光场的口径函数,令  $A(x, y, t_n)$  表示在  $t_n$  时刻信号的光场复振幅,  $\phi(x, y, t_n)$  表示  $t_n$  时刻接收信号中的相对信息相位值,满足如下关系:

$$\Delta\phi(x, y, t_n) = \phi(x, y, t_n) - \phi(x, y, t_{n-T}) = \begin{cases} 0, & \text{demodulated information "0"} \\ \pi, & \text{demodulated information "1"} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $T$  表示调制数据的信息编码周期,等于光束在两非等臂支路衍射传播的时间差,即自相位延迟。 $W(x, y, t_n)$  表示光信号经过扰动大气后包含的像差项。由于高速率通信速率达到 Gb/s 级别,则值近似  $W(x, y, t_n) \approx W(x, y, t_{n-T})$ ,  $A(x, y, t_n) \approx A(x, y, t_{n-T})$ 。

光信号经过望远镜<sup>[11]</sup>后时变光场为

$$U_0(x_0, y_0, t_n) = BU_{in}(-Mx_1, -My_1, t_n) P_{in}(-Mx_1, -My_1), \quad (3)$$

这里入射信号光斑口径大于望远镜口径。其中令  $B = \frac{M \exp(jkL_R)}{-\lambda^2 F_1 F_2}$ ,  $L_R = 2(F_1 + F_2)$  表示望远镜长度,  $F_1$  和  $F_2$  分别是接收望远镜目镜和物镜焦距,  $P_{in}(x, y)$  是入射系统光斑的入瞳口径, 望远镜放大倍数  $M = F_1/F_2$ 。

信号光  $U_0(x_0, y_0, t_n)$  通过 PBS1 进入非等臂干涉结构(简图如图 4 所示), 经过桥接器内的波片和偏振分束器, 在光电探测器得到时变光场分布

$U_5(x_5, y_5, t_n)$ , 即

$$U_5(x_5, y_5, t_n) = U_0(x_0, y_0, t_n) \otimes f_z(x_5 - x_0, y_5 - y_0). \quad (4)$$

式中  $\otimes$  代表二维卷积,  $f_z(x, y)$  表示自由空间传播系统的脉冲响应函数,

$$f_z(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right]. \quad (5)$$

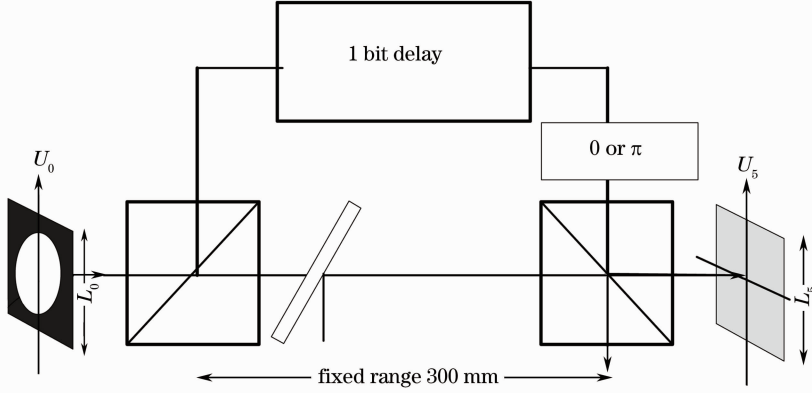


图 4 DPSK 自差分干涉分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram of self-differential interference of DPSK

如图 4 所示,  $L_0, L_5$  分别表示差分系统的入射面和接收面尺寸, 差分支路有 1 bit 的延时  $T$ , 假设第  $i$  时刻差分系统的差分长支路和差分短支路光场分别为

$$U_{5\_up}(x_5, y_5, t_{i-T}) = U_0(x_0, y_0, t_{i-T}) \otimes f_{L_1}(x_5 - x_0, y_5 - y_0), \quad (6)$$

$$U_{5\_down}(x_5, y_5, t_i) = t_p \cdot U_0(x_0, y_0, t_i) \otimes f_{L_1}(x_5 - x_0, y_5 - y_0), \quad (7)$$

式中  $t_p = \exp[j\phi(t_i)]$ , 表征精密相位控制器对端支路的相位调制,  $L_1$  和  $L_2$  分别表示上下支路光程。(6)式和(7)式分别用菲涅耳模型展开可得

$$U_{5\_up}(x_5, y_5, t_{i-T}) = \iint_{0 < \sqrt{x_0^2 + y_0^2} < L_0/2} \exp[jkW(-Mx_0, -My_0, t_{i-T}) + j\varphi(-Mx_0, -My_0, t_{i-T})] \cdot AB \frac{\exp(jkL_1)}{j\lambda L_1} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda L_1} [(x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (8)$$

$$U_{5\_down}(x_5, y_5, t_i) = \iint_{0 < \sqrt{x_0^2 + y_0^2} < L_0/2} t_p \exp[jkW(-Mx_0, -My_0, t_i) + j\varphi(-Mx_0, -My_0, t_i)] \cdot AB \frac{\exp(jkL_2)}{j\lambda L_2} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda L_2} [(x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (9)$$

式中  $A$  和  $B$  分别表示复常数。

那么, 在  $2 \times 4 \ 90^\circ$  自由空间光学桥接器输出端, 每个探测器端接收到的干涉光场分别为  $U_{5\_up}(x_5, y_5, t_{i-T})$  和  $U_{5\_down}(x_5, y_5, t_i)$ 。假设光电探测器在探测面上有统一的探测响应, 采用零差探测<sup>[12]</sup>, 则与含波面像差的两个光信号相匹配的零差探测效率  $\eta(v, t_n)$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$\eta(v, t_i) = \frac{\left| \iint_{A_5} U_{5\_up}(t_{i-T}) U_{5\_down}^*(t_{i-T}) dx_5 dy_5 \right| \left| \iint_{A_5} U_{5\_up}^*(t_{i-T}) U_{5\_down}(t_{i-T}) dx_5 dy_5 \right|}{\iint_{A_5} |U_{5\_up}(t_{i-T})|^2 dx_5 dy_5 \iint_{A_5} |U_{5\_down}(t_{i-T})|^2 dx_5 dy_5}, \quad (10)$$

式中  $A_5$  表示探测器面积。此时在探测器上,第  $i$  时刻偏振干涉光的场分布为

$$U_5(x_5, y_5, t_i) = U_{5\_up}(x_5, y_5, t_{i-T}) + U_{5\_down}(x_5, y_5, t_i). \quad (11)$$

在平衡探测端干涉光场强度分布为

$$I_5(x_5, y_5, t_i) = E_0 \iint_{0 < \sqrt{x_0^2 + y_0^2} < L_0/2} \cos\left\{-\phi(t_i) + \Delta\delta + \Delta\varphi + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\Delta L}{L_1 L_2} [(x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0. \quad (12)$$

(12)式化简取实部,忽略直流项,光程差  $\Delta\delta = k(L_1 - L_2)$ 。令  $E_0 = \frac{A^2 B^2}{\lambda^2 L_1 L_2}$ , 则探测器接收到的光电流为

$$i_5(x_5, y_5, t_i) = \frac{\eta_0 e}{2h\nu_0 z_0} \iint_{A_5} I_5(x_5, y_5, t_i) dx_5 dy_5, \quad (13)$$

式中  $z_0$  表示探测器周围介质的特性阻抗,  $\eta_0$  表示探测器的量子效率,  $e$  表示电荷常数,  $h$  表示普朗克常数,  $\nu_0$  表示光子效率。将(12)代入(13)得零差探测光功率值,即

$$i_5(x_5, y_5, t_i) = CE_0 \iint_{A_5} \left\{ \iint_{0 < \sqrt{x_0^2 + y_0^2} < L_0/2} \cos\left\{\Delta\varphi + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\Delta L}{L_1 L_2} [(x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2]\right\} \cdot dx_0 dy_0 \right\} dx_5 dy_5, \quad (14)$$

式中令常数  $C = \frac{\eta_0 e}{2h\nu_0 z_0}$ ,  $\Delta L = L_1 - L_2$ , 为保证  $\Delta\delta -$

$\phi(t_i) \approx 0$ , 则  $\phi(t_i) = 2\pi \text{mod}\left(\frac{L_1 - L_2}{\lambda}\right)$ , mod 表示

取余。用  $v$  表征激光通信速率(单位为 Gb/s),  $v = \frac{c}{\Delta L}$ ,  $c$  为光速。

零差相干探测得到的干涉图样的强弱变化反映载波中的相位信息。由理论推导可以看出,解调信息并不依赖于光信号的绝对相位,将干涉的相位相减可以在一定程度上抵消信号波面由于大气扰动带来的相位受损和像差影响,通过数据处理电路,判定相位信息对应的码元值。由于引入精密相位控制器,微调两支路相位差,使得该相位差值趋近于 0 或  $\pi$ ,提高相干对比度,降低接收功率的动态范围。

## 4 数值仿真结果

### 4.1 在差分干涉仿真模型中分析波面像差

模拟在不同大气湍流强度下,包含信息的光信号绝对相位发射严重畸变,含像差波面进入自由空间差分干涉接收系统。用大气相干长度  $r_0$  来定义激光在湍流大气中传输到离发射端距离为  $z$  处时,光束横截面相位的相干距离,它表示光波通过湍流传播的衍射极限,对星地激光大气传输特性有较大影响。考虑到星地激光通信链路实际运行情况<sup>[13]</sup>,选取星地激光通信链路在斜程  $45^\circ$  的传输工作方式,此时大气相干长度  $r_0$  还应考虑链路传输的天顶角  $\alpha$  以及探测端海拔高度  $H$  等参数,此时  $z = H \sec \alpha$ 。

根据经典 Kolmogorov 湍流谱推导得到对于  $\lambda$  波长平面波,大气相干长度  $r_0$  与大气折射率结构常数  $C_n^2(h)$  的关系为

$$r_0 = \left[0.423k^2 \sec \alpha \int_0^{h_0} C_n^2(h) dh\right]^{-3/5}. \quad (15)$$

湍流强度不同,对光学相位影响不同。用大气折射率结构常数  $C_n^2(H)$  表征大气湍流效应,  $n$  值变化表示湍流效应由弱到强的变化。大气湍流效应引入的像差拟合多项式可表示为

$$W_n(x, y, t_i) = 0.869xk_n + 0.067 \frac{x^2 + y^2}{2R_n} +$$

$$o(x^3, y^3) + o(x^4, y^4) + \dots, \quad (16)$$

式中系数  $k_n$  表征在  $x$  方向(或者  $y$  方向也可)与湍流强度对应的倾斜因子,  $k_n = \frac{3\lambda\sigma_T}{\pi D}$ , 其中  $\sqrt{\sigma_T^2} =$

$$\sqrt{0.869} \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/6}, D \text{ 为接收望远镜的口径尺寸}; R_n \text{ 代表与湍流强度相对应的二次项相位曲率半径}, R_n = \frac{\pi D^2}{12\lambda\sigma_{2nd}^2}, \text{其中 } \sqrt{\sigma_{2nd}^2} = \sqrt{0.0673} \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/6}。$$

从(16)式可以看到,波前像差<sup>[14]</sup>级次构成和各项所占比例有关。第一项,经过准直的高斯光束,受大气湍流破坏,波面倾斜。采用 Zernike 倾斜像差来表征线性项相位误差<sup>[15]</sup>,该误差比例占 86.9%;二次项相位误差比例占 6.7%,前两项像差构成波前像差主要部分,所以波前像差式可表示为

$$W_n(x, y, t_i) \approx 0.869xk_n + 0.067 \frac{x^2 + y^2}{2R_n}. \quad (17)$$

建立仿真模型,拟合线性相位像差和二次项相位像差,探究不同湍流强度下,光电探测器端采用零差探测时的效率变化趋势。

#### 4.2 仿真参数设置和数值模拟结果

从差分接收机的望远镜端开始,接收的 DPSK 调制信号光束在自差分接收系统中的传播都属于菲涅耳近场衍射传输<sup>[16]</sup>。数值模拟仿真参数设置如表 1 所示,仿真示意图如图 4 所示。

表 1 差分干涉系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of differential interference system

Items	Value
Wavelength $\lambda$ /m	$1.064 \times 10^{-6}$
Propagation distance in atmosphere $L$ /m	$15 \times 10^3$
Radius of telescope $D$ /m	0.3
Magnification of telescope $M$	60
Diameter of focused light spot $D_0$ /m	0.005
Communication rate $v$ /(Gb/s)	0.155, 0.622, 2.5, 10
Distance of the down-branch $L_2$ /m	0.3
Distance of the up-branch $L_1$ /m	2.235, 0.782, 0.42, 0.3

##### 4.2.1 接收端零差探测效率变化

使用 Matlab 软件数值模拟光束衍射过程。依据同步数字体系(SDH)同步传送模块,高速率通信

表 2 不同湍流强度下,波面像差系数对照表

Table 2 Contrast of different wave aberration coefficients in different atmosphere turbulences

$n$	$C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	$r_0/\text{m}$	$k_n/\mu\text{rad}$	$R_n/\text{km}$
0	0	0	0	$+\infty$
1	$10^{-17}$	0.613153	1.769966	152.62
2	$5 \times 10^{-17}$	0.23345	3.9578	68.253
3	$10^{-16}$	0.154017	5.59712	48.262
4	$5 \times 10^{-16}$	0.58639	12.516	21.584
5	$10^{-15}$	0.038687	17.6997	15.262
6	$5 \times 10^{-15}$	0.014729	39.578	6.8253
7	$10^{-14}$	0.009717	55.97125	4.8262
8	$5 \times 10^{-14}$	0.0036999	125.16	2.1584
9	$10^{-13}$	0.002441	176.9966	1.5262
10	$5 \times 10^{-13}$	0.0009293	395.78	0.68253
11	$10^{-12}$	0.0006132	559.7125	0.48262

不同大气湍流强度,星地激光通信自由空间差分干涉接收系统的零差探测效率<sup>[17]</sup>变化如图 5 所示。其中,横坐标取对数。

从图 5 可以看到,随着大气折射率常数值的增大,湍流效应增强,自由空间差分干涉系统的零差探测效率由最初的平缓减小突变为急剧下降,直到零差探测效率下降到 0。对于特定的大气湍流情况,

分 STM-1,STM-4,STM-16 和 STM-64 四个级别,相应的数字通信速率  $v$  分别是 0.155,0.622,2.5,10 Gb/s。为保证接收面最大范围接收入射面光束的能量,选取比值  $\eta_r$  来判断接收面尺寸,即

$$\eta_r = \frac{I_5}{I_0}, \quad (18)$$

式中  $I_5$  为接受面光场强度, $I_0$  为入射面光场强度。

在既定的参数设置下,经过菲涅耳衍射模型的模拟验证,取满足  $\eta_r \geq 98\%$  时的接收面尺寸  $L_5 \geq 8$  mm。根据离散采样条件  $\Delta x_0 \leq \frac{\lambda L_1}{D_0}$  的要求,选取

入射面和接收面采样间隔  $\Delta x_0, \Delta x_5 = 0.01$  mm。

第  $i$  时刻差分接收系统的入射波面光场分布  $U_0(x_0, y_0)$  为

$$U_0(x_0, y_0, t_i) = BA \exp[jkW(x, y, t_i) + j\varphi(-Mx_0, -My_0, t_i)] P_m(-Mx_0, -My_0). \quad (19)$$

根据(18)式拟合多项式,大气信道距离大约是  $L = 15 \times 10^3$  m。 $C_n^2$  值的范围一般是  $10^{-17} \text{ m}^{-2/3} \leq C_n^2 \leq 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ <sup>[13]</sup>。 $C_n^2$  值的变化反映大气湍流强度不同,波面倾斜程度和二次项畸变也不同,对干涉系统影响略有差别。表 2 列出了部分  $C_n^2$  值以及其对应的倾斜因子  $k_n$  和二次项曲率半径  $R_n$  值。

通信速率越高,该差分干涉结构的零差探测效率相对越高。如图 5 所示,对低速率通信  $v = 155$  Mb/s,在  $C_n^2 \leq 10^{-16.5} \text{ m}^{-2/3}$  的弱湍流效应时,零差探测效率值达到 80%,随后效率值  $\eta(v, t_i)$  骤减。同理,低速率通信  $v = 622$  Mb/s 的情况,只有在大气折射率常数  $C_n^2 \geq 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  的湍流强度范围内,才能保证零差探测效率  $\eta(v, t_i) \geq 85\%$ 。然而,速率达到

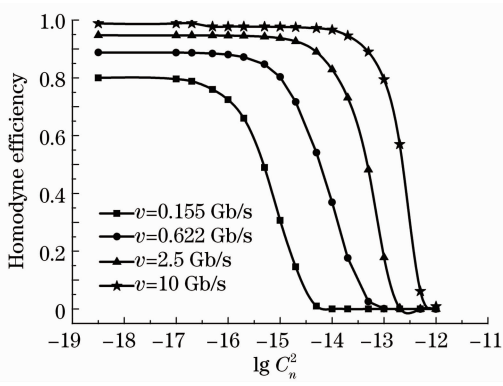


图5 零差探测效率随大气湍流强度变化情况

Fig. 5 Homodyne efficiency versus atmosphere turbulence

2.5 Gb/s和10 Gb/s的高速率通信,对湍流强度的容限明显加宽,即大气折射率常数分别满足  $C_n^2 \leq 10^{-14.5} \text{ m}^{-2/3}$  和  $C_n^2 \leq 10^{-13.5} \text{ m}^{-2/3}$  时,零差探测效率超过95%,接收端信噪比增大,干涉光强对比度增强。

### 4.3 结果分析

自由空间差分干涉系统克服大气湍流效应,解调高速率星地激光通信中的光学相位信息。结构简单紧凑,易于实现,可有效避免光学透镜本身像差和光学器件加工误差对接收效率的影响。

理论分析表明,当湍流效应增强时,受损波面二次项相位像差通过差分相减抵消,在接收端对干涉光场波面的影响较小。此外,波面存在一定角度倾斜像差,经过差分两支路衍射,在探测器端接收的干涉光斑发生偏离。进一步数值模拟可以看出,由于两支路衍射距离不同,在接收面两个光斑产生的偏移量不同,故两光斑的相对偏移量越大,光电探测端零差探测效率越低。这说明,自由空间差分干涉结构系统,在每一个特定的通信速率,对大气湍流效应都有一定的容限,当大气折射率常数  $C_n^2$  超过相应的容限值时,零差探测效率值  $\eta(v, t_i)$  下降,即当通信速率  $v$  为0.155,0.622,2.5,10 Gb/s时,大气折射率常数  $C_n^2$  的容限值分别为  $10^{-16.5}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-14.5}$ ,  $10^{-13.5} \text{ m}^{-2/3}$ 。当湍流效应超过该值时,探测器零差探测效率急剧下降,导致偏振干涉对比度降低,误码率提高,最终无法解调信息相位。此时,自由空间差分干涉系统无法满足通信要求,需要更完备的接收装置解调星地激光通信中的光学相位信号。

## 5 结论

理论分析了自由空间差分干涉系统在星地激光

通信链路中解调 DPSK 信号的过程方法和基本原理,也探究了在 SDH 中,大气湍流效应改变信号光的波前相位,差分系统通过差分相减克服畸变波前对信息解调的影响。数值模拟了激光通信速率为155 Mb/s, 622 Mb/s, 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 时,光电探测端接收光信号零差效率和大气湍流效应的变化关系,并提出在不同的通信速率要求下,自由差分干涉系统对大气折射率常数  $C_n^2$  的容限条件,以便在外场通信实验中,依据湍流强度和通信速率要求采取不同的差分接收装置,这将是下一步研究工作的重点。

### 参 考 文 献

- Liu Liren. Laser communications in space I: optical link and terminal technology [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 3-20. 刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术 [J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.
- Liu Liren. Laser communications in space II: test and verification techniques on the ground [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 147-155. 刘立人. 卫星激光通信 II: 地面检测和验证技术 [J]. 中国激光, 2007, 34(2): 147-155.
- Nielsen T, Oppenhusen G. In-orbit test result of an operational intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX [C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- Smutny B, Kaempfer H, Muehlwinkel G, et al.. 5.6 Gb/s optical intersatellite communication link [C]. SPIE, 2009, 7199: 719906.
- Sodnik Z, Armengol J, Perdigues, Reinhard H, Czichy, et al.. Adaptive optics and ESA's optical ground station [C]. SPIE, 2009, 7464: 746406.
- Gnauck A H, Winzer P J. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. J Lightwave Technology, 2005, 23(1): 115-130.
- Zhu Luan, Yu Zhou, Yanan Zhi. An aperture-matched phase-compensated differential phase shift keying receiver with a 90° hybrid [C]. SPIE, 2011, 8162: 816200.
- Garreis R, Zeiss Carl. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. SPIE, 1991, 1522: 210-219.
- Wan Lingyu, Zhou Yu, Liu Liren, et al.. A free-space 2×4 90° optical hybrid with electro-optic modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0723002. 万玲玉, 周煜, 刘立人等. 电光调制 2×4 90° 相移空间光学桥接器 [J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0723002.
- Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Yanan, et al.. Polarization-splitting 2×4 90° free-space optical hybrid with phase compensation [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3291-3294. 周煜, 万玲玉, 职亚楠, 等. 相位补偿偏振分光 2×4 90° 自由空间光学桥接器 [J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3291-3294.
- Dai Enwen, Sun Jianfeng, Yan Aimin, et al.. Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528003. 戴恩文, 孙建锋, 闫爱民等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528003.
- Fink D. Coherent detection signal-to-noise [J]. Appl Opt, 1975, 14(3): 689-690.
- Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 121-159. 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 121-159.

- 14 Sasiela, Richard J. Electromagnetic Wave Propagation in Turbulence: Evaluation and Application of Mellin Transforms [M]. Bellingham: SPIE Press, 2007. 334—423.
- 15 Noll Robert J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(3): 207—211.
- 16 Liu Liren, Wang Lijuan, Luan Zhu, *et al.*. Mathematical and physical basis for pointing, acquisition and tracking testing of inter-satellite laser communication terminals [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1329—1334.  
刘立人, 王利娟, 栾 竹, 等. 卫星激光通信终端光跟踪检测的数理基础[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1329—1334.
- 17 Giggenbach D. Wavefront measurements at ESA's optical ground station and simulation of heterodyne receiver performance [C]. SPIE, 2000, 3932: 78—289.

栏目编辑: 王晓球