

一种轨道角动量在大气湍流中的畸变补偿方法

□杨启强 中南民族大学

【摘要】 轨道角动量光束 (OAM) 因为具有特殊的螺旋波前相位, 作为信息载体在自由空间中传输时可以极大地提升通信频谱效率和信道容量, 引起众多学者关注与研究。然而, 在 OAM 光束传输系统中, 由于大气湍流的影响, 引起光束信号畸变, 功率弥散, 降低通信质量。因此本论文提出一种基于液晶空间光调制器的 OAM 复用通信“预补偿”方法, 将相差分布函数与液晶空间光调制器相结合, 在发送端对 OAM 光束进行畸变校正, 整体提高了 OAM 通信系统的通信性能。

【关键词】 傅里叶光学 大气湍流 GS 相位恢复算法 预补偿

引言

自 1992 年 Allen 等人发现了拉盖尔高斯光携带有轨道角动量以来, 便引起了科学家的注意。轨道角动量与其方程中的相位项 $\exp(il\theta)$ 有关。轨道角动量 (OAM) 虽然具有多种优良的特性。但在传输过程中受到大气湍流的影响, 会造成相位扭曲失真, OAM 信道展宽, 功率弥散, 从而影响整个通信系统的误码率, 降低通信质量。为了解决这些问题, 科学家们提出了各种方法, 在 OAM 大气传输相位变化时, 采用迭代算法对相位进行补偿, 在一定程度上降低了由大气湍流造成的影响。

液晶空间调制器不仅可以产生高质量的激光光束, 而且具有动态、实时、相应时间快、高精度和高分辨率等优点。因此被广泛采用。本文采用有反射式液晶空间调制器产生涡旋光束, 用透射式液晶空间调制器模拟大气湍流, 从而提出了一种“预补偿”方法, 在传输端对轨道角动量进行补偿。

一、实验原理及装置

1.1 传输模型原理图

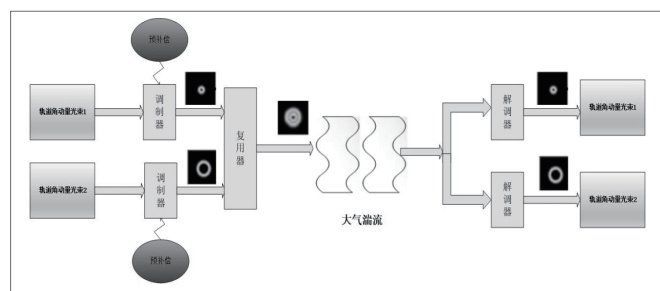


图 1 预补偿原理模型图

高斯光束入射到加载有初始螺旋相位图的反射式纯位相型液晶空间光调制器 (SLM) 面, 经 SLM 上初始螺旋相位图调制形成 OAM 光束经过大气湍流被 CCD 相机接收。将 CCD 相机接收到的光强信息代入 GS 算法可以得到 SLM 面上的恢复螺旋相位图, 这个恢复螺旋相位图包含有初始螺旋相位图信息及像差信息, 设初始螺旋相位图分布函数为 $I(x, y)$ 恢复螺旋相位图分布函数为 $R(x, y)$, 若恢复螺旋相位图与初始螺旋相位图旋向相同, 则像差的分布函数为

$$A(x, y) = I(x, y) - R(x, y); \quad (1)$$

若恢复螺旋相位图与初始螺旋相位图旋向相反, 则像差的分布函数为

$$A(x, y) = I(x, y) - [255 - R(x, y)]; \quad (2)$$

对于其他显示在 SLM 面上的相位图只要再加上 (1) 式中的像差分布函数 $A(x, y)$ 就能够对经过该液晶空间调制器上的轨道角动量光束“预补偿”。

1.2 大气湍流模型

大气折射率随着时间和空间的改变而改变, 通过大气湍流信道的长度同样也是随机的。因此, 大气湍流模型仅需给出统计平均值, 如折射率功率谱和折射率结构函数。建立大气湍流相位屏的关键就在于如何生成随机过程独立表达式, 即相位屏是将计算机产生的随机数看成大气湍流屏上的二维相位值阵列来建立。

相位通常可以写成各种基础函数的权重加和形式, 常用的基组为泽尔尼克多项式和傅里叶数列。而最常见的大气湍流仿真方法是由 McGlamery 最先引入的以快速傅里叶变换 (FFT) 为基础的功率谱反演法。

假设湍流诱导相位 $\phi(x, y)$ 为傅里叶变换函数, 可将其改写成傅里叶积分表征, 即

$$\phi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(f_x, f_y) e^{i2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y \quad (3)$$

式中: $\Psi(f_x, f_y)$ 为相位的空间频率域表征。

为了在有限的网格上生成相位屏, 需将式 (4.18) 改成傅里叶级数 (FS)

$$\phi(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{n,m} \exp[i2\pi(f_{x_n} x + f_{y_m} y)] \quad (4)$$

式中: f_{x_n}, f_{y_m} 为 x 和 y 方向的离散空间频率; $c_{n,m}$ 为傅里叶级数系数。

由于通过大气的相位变化是随机的, 并且每条光路之间的随机变化互不干扰, 因此采用中心极限定理可以确定 $c_{n,m}$ 具有高斯分布。同样需要注意, 傅里叶系数 $c_{n,m}$ 一般是复数。每一个实部和虚部分别具有零平均值和相等的方差, 并且互相之间的交互协方差为零。因此, 傅里叶系数需与具有方差和零平均值的环形复高斯统计特性保持一致, 即

$$\langle |c_{n,m}|^2 \rangle = \Phi_{\phi}(f_{x_n}, f_{y_m}) \Delta f_{x_n} \Delta f_{y_m} \quad (5)$$

该方法并不能准确生成相位屏, 相位屏统计函数不能很好地匹配理论结构函数, 其生成的相位功率谱在较低空间频

率有很高的功率。目前各国学者已经提出若干种方法用于补偿这种缺点，例如 Cochran、Rodier[和 Jakobssen 等参考了诺尔报道的泽尔尼克模式统计，采用泽尔尼克多项式的随机曲线或线性组合，Welsh 和 Eckert 等人采用非均匀采样的方法获得低频采样。本文将高频率与低频率结合，利用低频傅里叶级数方法 FT 屏来补偿这种缺点。即分次谐波法，利用低频傅里叶级数放大 FT 屏。

1.3 GS 算法基本原理

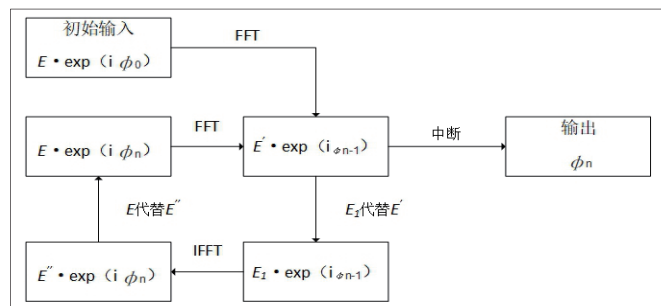


图 2 GS 算法流程图

GS 算法的已知量为输入平面的振幅 a 和输出平面的振

幅 A' ，通过输入、输出光场的光强分布来迭代算出输出光场的相位。在 GS 算法原理中，关键步骤在于在每一次的迭代运算中将实际探测到的输入平面和输出平面的振幅 a ， A' 来替换迭代运算后得到的振幅 a' ，这样便可以在循环运算中通过不断对空域和频域中的数值加以限制，实现目标数值的不断收敛，才能得到最佳结果。流程图如图 2。

二、模拟仿真实验及结果

在 matlab 中进行仿真，选取在 $C_n^2=10^{-17}$ 次方的弱湍流下。

表 1。

三、结论

提出了一种“预补偿”算法，基于 GS 相位恢复原理。用初始相位分布函数减去 GS 算法相位恢复后的相位分布函数，得到相差函数，再叠加到液晶空间调制器上，用来补偿每一束经过液晶空间调制器上的光束。经过模拟仿真结果显示，复用轨道角动量光束功率提高为：拓扑荷 +1 的轨道角动量光束提高了 11.1%，拓扑荷 -1 的轨道角动量光束提高了 10.6%。总体来说用“预补偿”算法补偿输入轨道角动量光束提高了通信系统的通信性能，降低了误码率。为以后轨道角动量在实际通信传输应用中奠定了一定的基础。

表 1 弱湍流下复用光束预补偿效果对比

弱湍流下	光强	相位	螺旋功率谱
初始完美光束			
无预补偿			
有预补偿			

参 考 文 献

- [1]Wang J,Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012,6(7):488-496.
- [2] 袁小聪, 贾平, 雷霆等. 光学涡旋与轨道角动量光通信 [J]. 深圳大学学报理工版, 2014,31(4): 331-346.
- [3] Huang H, Xie G, Yan Y, et al. 100Tbit/s free-space data link enabled by three-di-mensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength.[J]. Optics Letters, 2014, 39(2):197-200.
- [4] 关克强. 轨道角动量光束在大气湍流中的畸变及其补偿方法研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5]Tatarskii V L Wave propagation in a turbulent medium[M]. Washington: McGraw-Hill,1961:1-78.
- [6] C.Paterson.Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photonsfor optical commumcation [J]. Physical Review Letters,2005,94(153901):1-4.
- [7] 王由平, 郑明杰, 陈大强. “基于 Gerchberg-Saxton 相位恢复算法改进的涡旋光束生成.” 激光与光电子学进展 10(2015):104-109.

杨启强 (1991-) 男, 汉, 湖北武汉市, 中南民族大学 电子信息工程学院, 硕士, 研究方向: 光通信与光器件