

水平大气信道对圆偏振光偏振特性的影响

于创利¹, 马晶², 高鹏涛², 于虹¹, 廖登华³, 王猛¹

- (1. 中国航天科工集团第九总体设计部, 湖北 武汉 430040;
2. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 中国航天科工集团第四研究院, 湖北 武汉 430040)

摘要: 基于 Mie 散射理论利用偏振相关的 Monte Carlo 仿真方法对圆偏振光在水平大气中传输进行建模仿真。仿真结果表明:在大气能见度为 5 km、传输距离为 11.16 km 条件下,接收光斑中心处保偏性能很好,且优于接收光斑边缘处保偏性能。进行了 11.16 km 水平大气链路左旋圆偏振光退偏实验,实验结果表明:在大气能见度为 5~10 km,大气折射率结构常数 $C_n^2=1.825\times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下,左旋圆偏振光经过长距离水平大气信道传输后偏振旋向不发生改变;接收光斑中心处保偏性能良好,优于接收光斑边缘处,和仿真结果趋势一致。

关键词: Mie 散射; Monte Carlo 模拟; 水平大气退偏实验

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0725-06

Horizontal atmospheric layer influence on polarization properties of circularly polarized laser beam

Yu Chuangli¹, Ma Jing², Gao Pengtao², Yu Hong¹, Liao Denghua³, Wang Meng¹

- (1. The 9th Designing of China Aerospace Science Industry Corp, Wuhan 430040, China;
2. Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. The Fourth Academy of China Aerospace Science & Industry Corp, Wuhan 430040, China)

Abstract: On the basis of Mie scattering theory, simulation of circularly polarized laser beam propagating in horizontal atmosphere is designed using Monte Carlo method with the consideration of polarization character. The simulations reveal that the polarization performance at the receiving spot center is fine and better than at the edges as atmospheric visibility is 5 km and transmission distance is 11.16 km. The depolarization characteristics of left-handed circularly polarized laser beam propagating in horizontal atmosphere at the distance of 11.16 km were measured. As a result, under the conditions of atmospheric visibility is 5-10 km and C_n^2 is $1.825\times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, the rotation of left-handed circularly polarized laser beam doesn't change and the polarization performance at the receiving spot center is better than at the edges. The experiment result has the same trend as simulation result.

Key words: Mie scattering; Monte Carlo simulation; horizontal atmospheric depolarization experiment

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-03

作者简介: 于创利(1988-), 男, 硕士生, 主要从事激光大气传输方面的研究。Email: hitycl@126.com

导师简介: 马晶(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事卫星光通信方面的研究。Email: majing@hit.edu.cn

0 引言

偏振编码系统具有光功率利用率大,对带宽需求小,误码率低等优点^[1],可实现量子卫星光通信。相干光通信具有接收灵敏度高、通信容量大等优点,可发展成为频率间隔更小的波分复用系统。高灵敏度的相干探测对本振光束和信号光束的偏振方向有严格的要求,即两光束的偏振方向应相同,否则探测灵敏度下降。而偏振激光在大气信道传输时,由于大气散射和湍流的作用会造成信号光偏振态的改变。从而造成相干光通信探测灵敏度降低、偏振编码系统误码率增加。有关研究表明,在卫星光通信中,大气对通信系统的影响可用约 10 km 近地水平大气链路进行模拟^[2]。且圆偏振编码相较于线偏振编码具有两方面优势,一方面系统工作过程中不需要进行发射端和接收端偏振轴的对正;另一方面圆偏振光在经历粒子散射时,其光强分布更均匀^[3]。因此研究圆偏振光在水平大气传输后偏振特性变化可为相干光通信中偏振补偿技术提供理论依据,同时可为偏振编码系统中大气信道建模以及系统误码性能改善提供理论借鉴。文中利用 Monte Carlo 法仿真分析圆偏振光在水平大气信道中传输经过多种散射元散射后的偏振变化特性,并进行了长距离外场实验验证。

1 偏振激光大气散射模型

1.1 散射模型

根据入射光波波长和散射元的半径大小关系,可将散射分为 Rayleigh 散射、Mie 散射和无选择性散射。而大气中大量的气溶胶粒子和云雾液滴等水分子的几何直径都在 Mie 散射范围内,所以可用 Mie 散射理论作为研究大气散射对激光偏振影响的理论基础^[4]。

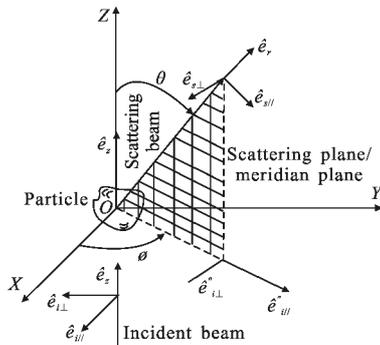


图 1 单次散射几何关系图

Fig.1 Geometric diagram of single-scatter

1.2 散射元参数选取

此次仿真中大气由云雾液滴等水分子及大气气溶胶两种散射元组成。云雾液滴等水分子的折射率 $n_1=1.32+i \times 0.0003$, 尺寸分布满足 Gamma 分布^[5]:

$$\frac{dN}{dr} = N a r^{\alpha} \exp(-B r^{\gamma}) \quad (1)$$

各参数可取值为 $\alpha=5, \gamma=2.16, a=1.105e-3, B=0.0782, N=400 \text{ cm}^{-3}$ 。

实际上,大气中的气溶胶粒子由几种不同的粒子组成,各散射元尺寸分布满足对数正态分布^[6]:

$$\frac{dN_i(r)}{dr} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} r \log \sigma_i \ln 10} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log r_{\text{mod}N_i}}{\log \sigma_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

该仿真中采用参考文献[5]中建立的混合大气散射粒子模型,模型由灰尘、非溶解性气溶胶和水溶性气溶胶三种散射元组成。对于大陆平均大气环境,各散射元含量及各参数如表 1 所示。

表 1 大陆平均大气环境下各气溶胶粒子散射元参数表

Tab.1 Parameter of aerosol particle under average continental atmospheric

Scatterers	N_i/cm^{-3}	Number mixing ratio	σ_i	$r_{\text{mod}N_i}/\mu\text{m}$	Index of refraction
Non-aerosol solubility	0.4	0.261e-4	2.51	0.471	1.77-0.460i
Water-soluble aerosol	7 000	0.458	2.24	0.021 2	1.51-0.023i
Dust	8 300	0.542	2.00	0.011 8	1.40-0.008i

1.3 散射相位函数选取

基于 Mie 散射理论相位函数的数值解非常复杂,且在仿真中占用大量的内存,消耗大量的时间。因此在 Monte Carlo 仿真中,利用广泛使用的 H-G 函数(公式(3)所示)近似表示散射相位函数,以确定散射角度:

$$F(\theta) = \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (3)$$

式中: g 为非对称因子,由 H-G 函数可确定散射角 θ 的抽样函数^[1]:

$$\theta = \begin{cases} \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[\frac{1+g^2}{(1-g^2)^2} - \frac{(1-g^2)^2}{(1-g+2g\xi)^2} \right] \right\} & \text{if } g \neq 0 \\ \arccos(2\xi-1) & \text{if } g = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ξ 为(0, 1)上均匀分布的随机数, 表示散射角取(0, θ)间的概率。则根据 H-G 函数, 方向角 φ 为:

$$\varphi = 2\pi\xi \quad (5)$$

对于圆偏振光, Mie 散射相位函数在其偏振方向上是轴对称的^[7], 说明散射相位函数与方位角 φ 无关, 所以 H-G 函数能很好地近似 Mie 散射相位函数。

2 仿真结果分析

仿真中每次发射 1 000 000 个光子, 通信波长为 1 550 nm, 光子初始 Stokes 参量为 [1, 0, 0, 1]^T, 即右旋圆偏振光; 光束的能量权重 W_0 为 1; 发射信号光为具有一定发散角, 强度分布为高斯分布的光; 大气能见度为 5 km。

将入射光为右旋圆偏振光时接收端光子的 Stokes 参量分区域显示在邦加球上, 如图 2 和图 3 所示。

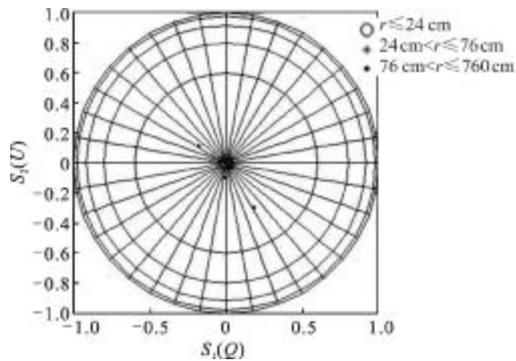


图 2 接收平面 $r < 760$ cm 范围内光子 Stokes 参量分布图
Fig.2 Stokes parameters distribution of photons at receiving plane when $r < 760$ cm

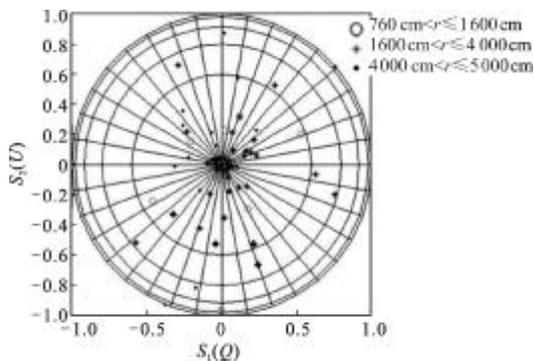


图 3 接收平面 $r > 760$ cm 范围内光子 Stokes 参量分布图
Fig.3 Stokes parameters distribution of photons at receiving plane when $r > 760$ cm

对比图 2 和图 3 可以看出, 当接收端和发射端对准的情况下, 在距离接收平面中心 $r = 24$ cm 范围内, 光子退化为椭圆偏振光的现象不明显; 在大于 24 cm 的范围内, 光子才明显地由圆偏振光退化为椭圆偏振光, 且退偏程度随着接收半径的增大而增大。

该仿真中入射信号光的发散角为 230 μ rad, 则传输 11.16 km 后接收端光斑大小约为 2.57 m。对仿真数据进行处理, 得到接收端光斑中心区域 ($r < 257$ cm)、边缘区域 (257 cm $< r < 5$ 000 cm) 光子的方向角 ψ (表征偏振光偏振方向) 和椭圆率角 χ (表征椭圆率及旋转方向) 的分布图, 如图 4~7 所示。

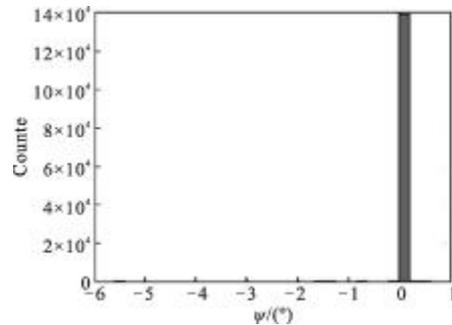


图 4 接收端光斑中心区域光子 ψ 角分布

Fig.4 Distribution of ψ angular at receiving spot center

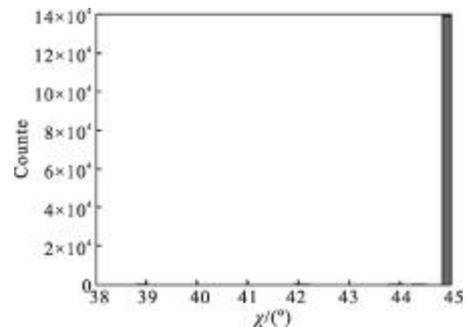


图 5 接收端光斑中心区域光子 χ 角分布

Fig.5 Distribution of χ angular at receiving spot center

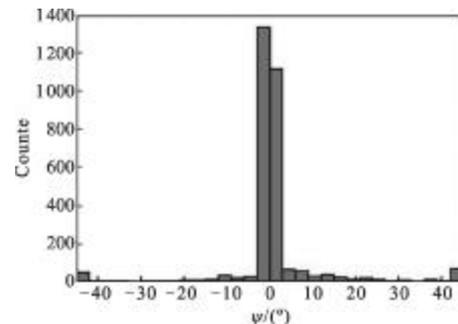
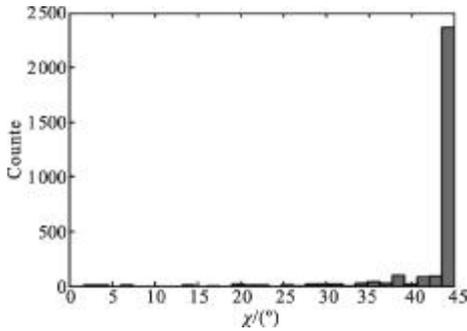


图 6 接收端光斑边缘区域光子 ψ 角分布

Fig.6 Distribution of ψ angular at receiving spot edges

图 7 接收端光斑边缘区域光子 χ 角分布Fig.7 Distribution of χ angular at receiving spot edges

在方向角 ψ 的统计分布图中,正值表示椭圆的空间取向沿 x 轴正方向逆时针偏转,负值表示椭圆的空间取向沿 x 轴正方向顺时针偏转,其绝对值则表示偏转的幅度。对比 4 个图可知,对于光斑中心区域,光子的保偏性能较好,通过统计计算,有 0.999 的概率方向角 ψ 的改变量不超过 0.01° ;同时,有 0.999 的概率椭圆率角 χ 的改变量不超过 0.01° 。对于光斑边缘区域,光子的保偏性能较差,且随机性比较大,通过统计计算,有 0.772 的概率方向角 ψ 的改变量不超过 1° ,不超过 0.1° 的概率为 0.595;同时,有 0.854 的概率椭圆率角 χ 的改变量不超过 3° ,不超过 0.1° 的概率为 0.632。

3 外场实验

该实验发射端和接收端分别位于北方某城市两栋楼楼顶, GPS 测得两点间直线距离 11.16 km,且近似认为链路水平。由于此链路经过城市、江河、湿地三种地貌,大气状况比沙漠、海岛要复杂的多,所以能很好地表征圆偏振光经过大气后偏振态的变化情况。实验选择在夜晚进行,时间大致在 22:00 至凌晨 2:00。测量过程中天气状况为多云,风力为 3~4 级(微风),大气能见度在 5~10 km 之间,室内温度和相对湿度分别为 23°C 和 30%。

实验所用偏振分析仪的输入功率值范围为 $-60\sim-10\text{dBm}$,偏振方向角和椭圆率角测量精度均为 $\pm 0.25^\circ$,偏振度测量精度为 $\pm 0.5\%$,测量波长范围为 1 300~1 700 nm,探头直径为 3 mm。设置偏振分析仪的工作波长为 1 550 nm,采样积分时间为 30 ms,每个采样周期采样 30.7 s,采样点为 1 024 个。

测量计算得到对应的大气折射率结构常数 $C_n^2 =$

$1.825 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,即此次实验过程中为中等偏强湍流情况。

将接收望远镜与发射端对准,调整发射端的俯仰角和水平转向,使功率计的度数最大,即在误差范围内可认为接受平面位于接收光斑中心。测量得到接收光斑中心偏振度(DOP)及归一化 Stokes 参量各分量随时间变化值如图 8~11 所示。

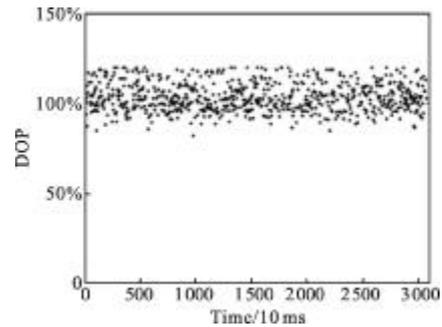
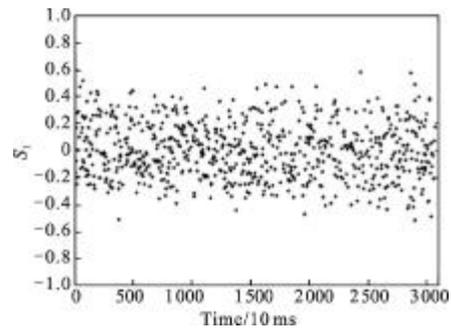
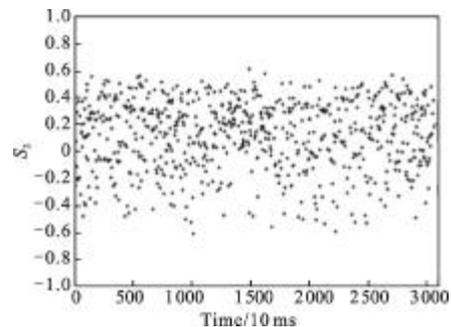


图 8 接收光斑中心偏振度变化图

Fig.8 Change map of DOP at receiving spot center with time

图 9 接收光斑中心 S_1 随时间变化图Fig.9 Change map of S_1 at receiving spot center with time图 10 接收光斑中心 S_2 随时间变化图Fig.10 Change map of S_2 at receiving spot center with time

接收光斑中心处偏振度随时间发生改变,实验时最小值为 80%,且 DOP 大于 90% 的时刻为 99.76%,可见光斑中心处保偏性能良好。通过计算可得,接收光斑中心处偏振度为 $103.5 \pm 7.9\%$,偏振度理

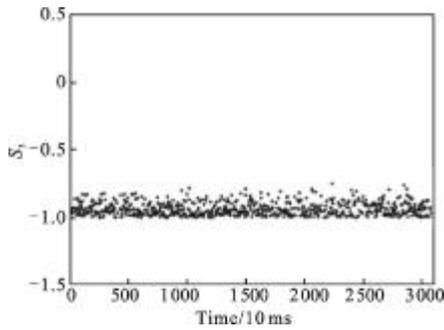


图 11 接收光斑中心 S_3 随时间变化图

Fig.11 Change map of S_3 at receiving spot center with time

论上是不可能大于 100%的,但是由于偏振分析仪存在测量误差,所以造成实际测量的偏振度大于 100%。而接收光束 Stokes 参量各分量的平均值和均方差分别为: $S_1=0.10\pm 0.29$, $S_2=0.14\pm 0.33$, $S_3=-0.87\pm 0.14$ 。进一步计算得到其偏振方向角 ψ 改变量的均值和均方差分别为 10.84° 和 3.81,椭圆率角 χ 的均值和均方差分别为 -35.79° 和 1.12,说明接收光束退化为椭圆偏振光。

为了直观了解信号光经过水平大气信道传输后的偏振特性,将各个时刻光束 Stokes 参量显示在邦加球上,如图 12 所示。由图 12 可以看出,左旋圆偏振光经过水平大气传输后光斑中心偏振旋向不发生改变。

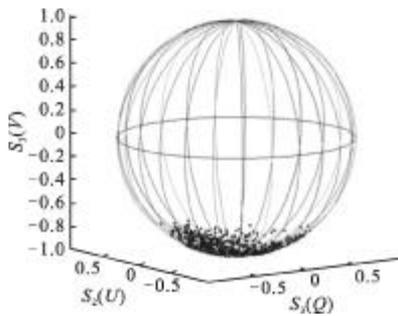


图 12 接收光斑中心偏振态邦加球分布图

Fig.12 Polarization map on poincare polarization sphere at receiving spot center

调整发射端三维转台的俯仰角,使接收端恰好能探测到信号,此时可认为偏正分析仪检测接收光斑边缘偏振特性。接收光斑边缘归一化 Stokes 参量各分量随时间变化值如图 13~16 所示。

光斑边缘偏振度随时间发生变化,且出现较大幅度变化,其中最小值为 38.5%,大于 90%的时刻占

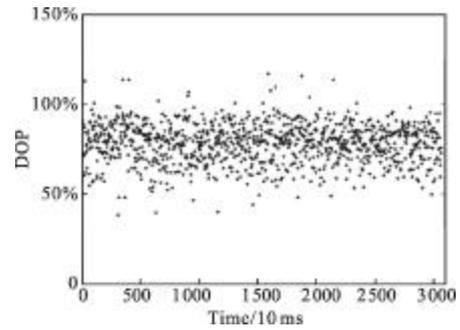


图 13 接收光斑边缘偏振度变化图

Fig.13 Change map of DOP at receiving spot edges with time

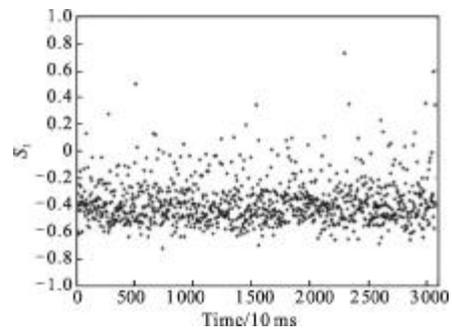


图 14 接收光斑边缘 S_1 随时间变化图

Fig.14 Change map of S_1 at receiving spot edges with time

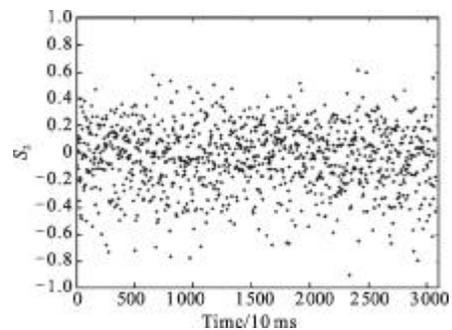


图 15 接收光斑边缘 S_2 随时间变化图

Fig.15 Change map of S_2 at receiving spot edges with time

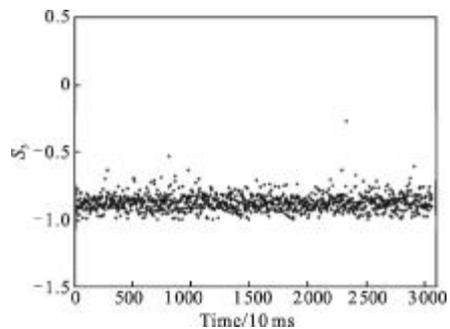


图 16 接收光斑边缘 S_3 随时间变化图

Fig.16 Change map of S_3 at receiving spot edges with time

13.9%。计算可得,接收光斑边缘处偏振度为 $78.50\pm$

11.00%, 可见光斑边缘处仍具有保偏性, 但是较光斑中心处而言, 保偏性能较弱。接收光束边缘 Stokes 参量各分量的平均值和均方差分别为: $S_1 = -0.44 \pm 0.17$, $S_2 = -0.35 \pm 0.30$, $S_3 = -0.74 \pm 0.13$ 。进一步计算得到其偏振方向角 ψ 改变量的均值和均方差分别为 16.01° 和 10.24 , 椭圆率角 χ 的均值和均方差分别为 -25.01° 和 0.83 , 说明接收光斑边缘处, 左旋圆偏振光退化为椭圆偏振光, 且偏振方向角 ψ 改变量及椭圆率角均比光斑中心处要大。

同样, 将各个时刻光束的 Stokes 参量显示在邦加球上如图 17 所示。

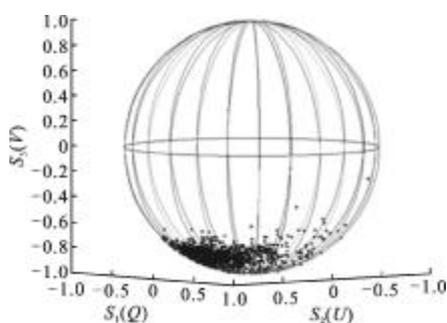


图 17 接收光斑边缘偏振态邦加球分布图

Fig.17 Polarization map on Poincare polarization sphere at the receiving spot edges

由图 17 可以看出即使在接收光斑边缘, 信号光的旋向仍然为左旋, 由此可以得出结论, 左旋圆偏振光经过长距离水平大气链路传输后, 在整个接收面上其偏振旋向均不发生改变。

4 结论

仿真模型中考虑了灰尘、非溶解性气溶胶和水溶性气溶胶三种散射元。仿真结果表明: 在大气能见度为 5 km, 传输距离为 11.16 km 条件下, 散射不改变圆偏振光的偏振旋向; 接收光斑中心处大多数光子为直达光子, 光的保偏性能很好, 可近似认为其偏

振态不变, 仍为圆偏振光; 接收光斑边缘光的保偏性能减弱, 由圆偏振光退化为椭圆偏振光, 其椭圆率角改变量在 3° 以内。实验结果表明: 在大气能见度为 5~10 km, 大气折射率结构常数 $C_n^2 = 1.825 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下, 左旋圆偏振光经过长距离水平大气信道传输后偏振旋向不发生改变。接收光斑中心处保偏性能良好, 优于接收光斑边缘处, 和仿真结果趋势一致。

参考文献:

- [1] Liu C, Sun Y X, Yao Y, et al. Analysis of direct detection and coherent detection in wireless optical communication with polarization shift keying [C]//CLEO/Pacific Rim 2009-8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009: 1-2.
- [2] Andrews L C, Philips R L. Laser beam propagation through Random Media[C]//SPIE, 1998.
- [3] Zhao Xinhui. Study on the circle polarization shift keying and the theory of polarization propagation in wireless optical communication [D]. Shenzhen: Shenzhen Graduate School of HIT, 2010: 22-45. (in Chinese)
- 赵新辉. 无线光通信中旋光调制技术及偏振传输理论的研究 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2010: 22-45.
- [4] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and cloud: the software package OPAC [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844.
- [5] Ambirajan A, Look D C. A backward Monte Carlo study of the multiple scattering of a polarized laser beam[J]. JQSRT, 1997, 58: 171-192.
- [6] Dominique Toublanc. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations[J]. Appl Opt, 1996, 35(18): 3270-3274.
- [7] Hopcraft K I, Chang P C Y. Properties of a polarized light-beam multiply scattered by a rayleigh medium [J]. Lecture Notes in Physics, 2000, 534: 135-158.