文章编号:1001-5078(2017)09-1158-06

·光纤及光通讯技术 ·

大气激光通信中传输能量损耗分析的应用研究

林冠杰,朱泽林,蔡杨伟男,何书航,何文森 (电子科技大学物理电子学院,四川成都 610054)

摘 要:对大气激光通信中的光传输能量损耗进行分析,着重讨论了造成接收端光功率损耗的 几个主要影响因素,并做了综合性的计算机仿真,得到发射功率一定的情况下发射天线轴向偏 焦和收发天线系统间横向偏移取不同量值时接收端光功率的变化。在损耗分析的基础上,文 章探讨了接收端满足最低光功率条件下,偏焦和偏轴相互间的关系,提出通过调节发射天线偏 焦来改善远距离接收端天线捕获的方法。在发射功率为10000 mW,距离为10 km,接收端光 功率阈值为50 mW的情况下,发射天线未偏焦时收发天线系统间的允许最大偏轴量为495.9 mm;当焦点偏移6.69 mm,允许最大偏轴量达到最大值为628.5 mm,与未偏焦的情况相比增 加了26.74%,满足接收端光功率要求下收发天线系统间允许横向偏移区域的面积增加了 60.63%,这有效地降低了大气激光通信中远距离接收端捕获的难度。 关键词:大气激光通信;能量损耗;卡塞格伦光学天线;偏焦;偏轴;捕获

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.019

Application research of transmission energy loss analysis in atmospheric laser communication

LIN Guan-jie, ZHU Ze-lin, CAI Yang-weinan, HE Shu-hang, HE Wen-sen

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The energy loss of optical transmission in atmospheric laser communication is analyzed. The main factors affecting the optical power loss of the receiver are discussed emphatically, and a comprehensive simulation is done. The change of the optical power at the receiving end is obtained when the transmitting power is constant and the axial offset of the transmitting antenna and the lateral deviation of the transmitting and receiving antenna system take different values. Based on the analysis of energy loss, the relationship between the offset and the off-axis was discussed under the condition that the minimum optical power requirement is satisfied at the receiver. A method of improving the antenna capture at the receiving end by adjusting the transmitting antenna bias in long-range free-space optical communication is proposed. Under the transmit power of 10000 mW, the distance of 10km, and optical power threshold of 50 mW at the receiving end, the maximum permissible axis deviation between the focal shift is 6. 69 mm, the maximum deviation is 628. 5 mm, which is increased by 26. 74% compared with the un-defocused condition, and the area of the lateral offset area between the receiving and receiving antenna system is increased by 60. 63% , which effectively reduces the difficulty of long-range receiver-side capture.

Key words: atmospheric laser communication; energy loss; Cassegrain optical antenna; defocusing; off-axis; acquisition

收稿日期:2017-02-09

作者简介:林冠杰(1995-),男,本科,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail:1219117340@ qq. com

通讯作者:何文森(1959-),男,高级工程师,主要从事空间光通信技术与仪器研发方面的工作。E-mail:hewensen@uestc.edu.cn

1 引 言

随着信息技术的发展,传统的微波通信由于带 宽资源有限,已经很难满足大容量通信的需求,光波 的频率高,具有很强的信息承载能力,因此,光通信 越来越为人们所重视。其中,大气激光通信在远距 离通信中有潜在的优势^[1-3],主要表现为无线优势 和容量优势,这一方面克服了光纤通信灵活性不足 的缺点,另一方面又解决了微波通信中信息容量小 的问题。

然而,时至今日,大气激光通信依然存在诸多局 限性^[4-5]。例如,激光与大气介质的相互作用、光学 发射天线的偏焦以及收发天线系统间的偏轴等都将 造成接收端的能量损耗。而且在远距离自由空间光 通信中,接收端天线系统的捕获尤其困难。

本文拟对造成大气激光通信中光传输能量损耗 的因素进行讨论,并在理论分析的基础上探究诸要 素相互间的关系,找到改善远距离激光通信中目标 接收端捕获的方法。

2 传输能量损耗的理论分析

假设经光学天线传输的是基模高斯光束^[6],所 对应的光场强空间分布函数可表示为:

$$U_{00}(x, y, z) = U_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left[k(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}) - \phi(z)\right]\right\}$$
(1)

其横截面上的光功率分布可描述为:

$$P(r) = P_0 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}}$$
(2)

其中, r 表示横截面上沿径向到光功率峰值 P_0 处的 距离; ω_0 是高斯光束的束腰半径;R(z) 为等相位面 的曲率半径; $\omega(z)$ 为高斯光束的光斑半径,可表示 为:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + (z/z_R)^2 \right]^{1/2}$$
(3)

$$R(z) = z[1 + (z_p/z)^2]$$
(4)

其中, $z_R = \pi \omega_0^2 / \lambda$,称为共焦参量。

R(z)和 $\omega(z)$ 可以完全表征高斯光束,于是,定 义复参数q(z)描述为:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}$$
(5)

在束腰处,即z = 0时,有 $R(0) \rightarrow \infty, \omega(0) = \omega_0$

$$q_0 = q(0) = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} = i z_R$$
(6)

卡塞格伦光学天线的系统结构简单,成像质量 优良,具有很好的消除球差的能力,并且不产生色 差,因而在光通信中常采用卡式天线作为光学发射 和接收天线^[7]。

卡式天线由抛物面作为主镜,副镜可选用抛物 面或双曲面。激光束经准直处理后可近似为平行 光,因此我们采用双抛物面卡式天线进行分析研究, 其结构如图1所示。



图1 双抛物面结构的卡塞格伦光学天线

Fig. 1 Cassegrain optical antenna with double parabolic structure

理想状态下,卡式天线的主镜和副镜共焦,根据 抛物面的光学性质,平行光束经副镜反射后相当于 是从主镜的焦点位置发出,再经主镜反射最后平行 于主光轴出射。

在实际应用中,由于一些不可预测的外部因素, 比如轻微的碰撞或光学镜面畸变,会导致主镜和副 镜的焦点产生偏移,所以,有必要对卡式天线的偏焦 特性进行分析,限于篇幅,本文仅考虑轴向偏焦的 情况。

根据矩阵光学理论^[8],在主镜和副镜共焦的情况下,如图2所示。



图 2 高斯光束通过卡塞格伦天线中的传输变换 Fig. 2 Propagation transformation of Gaussian beam through Cassegrain antenna

激光束经卡式天线传输的光学变换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 - f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(7)

化简得:

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_1}{f_2} & \frac{f_1(f_2 + l_1)}{f_2} + \frac{f_2(l_2 - f_1)}{f_1} \\ 0 & \frac{f_2}{f_1} \end{bmatrix} (8)$$

为了使变换前后高斯光束的束腰分别位于入 射和出射参考面上,参考面的位置应满足如下 关系:

$$\begin{cases} l_1 = -f_2 \\ l_2 = f_1 \end{cases}$$
(9)

已知,高斯光束通过光学系统的变换可表示为:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}$$
(10)

把式(8)和式(9)代入式(5)、式(6)和式(10), 可得变换前后高斯光束的束腰半径满足如下关系:

$$\omega_{02} = \frac{f_1}{f_2} \omega_{01} \tag{11}$$

其中, ω_{01} 和 ω_{02} 分别表示入射和出射光束的束腰 半径。

当天线主镜和副镜的焦点在轴向上偏移δ时, 系统的光学变换矩阵为:

$$T(\delta) = \begin{bmatrix} 1 & l_2' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 - f_2 - \delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ \frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(12)

化简得:

$$T(\delta) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_1^2 - (f_1 - l_2)\delta}{f_1 f_2} & \frac{f_2(l_2 - f_1)}{f_1} \\ \frac{\delta}{f_1 f_2} & \frac{f_2}{f_1} \end{bmatrix}$$
(13)

將式(13)代入式(5)、式(6)和式(10),可得:
Re{
$$\frac{1}{q(z)}$$
} = $\frac{f_2^4(l_2^{'}-f_1)+z_R^2\delta[f_1^2-(f_1-l_2^{'})\delta]}{[f_2^2(l_2^{'}-f_1)]^2+\{z_R[f_1^2-(f_1-l_2^{'})\delta]\}^2}$
(14)
Im{ $\frac{1}{q(z)}$ } = $\frac{z_R\delta f_2^2(l_2^{'}-f_1)-z_R[f_1^2-(f_1-l_2^{'})\delta]f_2^2}{[f_2^2(l_2^{'}-f_1)]^2+\{z_R[f_1^2-(f_1-l_2^{'})\delta]\}^2}$

在出射光束的束腰处, 有 $R \rightarrow \infty, \omega = \omega_{02}$

$$\begin{cases} \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{q_{2}(z)}\right\} = 0\\ \operatorname{Im}\left\{\frac{1}{q_{2}(z)}\right\} = -\frac{\lambda}{\pi\omega_{02}^{2}} \end{cases}$$
(16)

可得到出射光束的束腰位置为:

$$l_{2}' = f_{1} - \frac{z_{R}^{2} f_{1}^{2} \delta}{z_{R}^{2} \delta^{2} + f_{2}^{4}}$$
(17)

变换前后高斯光束的束腰半径满足如下关系:

$$\omega_{02} = \frac{\omega_{01}}{\left[\left(f_2 / f_1 \right)^2 + \left(\delta / f_1 f_2 \right)^2 z_R^2 \right]^{1/2}}$$
(18)

在激光通信中,发射和接收天线系统的精确对 准很难实现,尤其是在大气激光通信中,要求各个光 学系统严格对准是极其困难的,因此,在光通信传输 能量损耗的研究中需要对收发天线系统的偏轴特性 进行分析。

选用相同结构的接收天线和发射天线,即主镜 直径 D = 2a,副镜直径 d = 2b,遮挡比 γ 的双抛物 面卡塞格伦天线,远场光斑半径为 ω 。

在远距离情况下,可以将收发天线系统之间的 偏轴等效为系统间的横向偏移,如图3所示。



其中, δh 表示收发天线系统之间的横向偏移 量。由图 3 可知,当发射和接收天线对准时,天线接 收光能量的有效区域为除副镜遮挡部分外的主镜镜 面。当收发天线系统之间存在偏轴时,有效接收区 域为远场光斑与天线有效面的相交部分,随着横向 偏移量的增大,有效接收区域将逐渐减小,当横向偏 移量增大到一定程度时,接收端有效接收区域内的 光功率将无法满足探测器的要求,使得接收端不能 检测到信号,进而导致通信受阻。

我们定义当收发系统间的横向偏移达到一定量 值时,有效接收区域内的光能量恰好可以满足接收 端探测器最低光功率要求,称此时的横向偏移量为 收发系统间的允许最大偏移量 *δh*_{max}。

3 传输能量损耗的仿真

远红外激光在大气中传输的性能上有着明显的 优势^[9],且 10.6 μ m 的波长正好处在大气信道传输 的低损耗窗口,因此我们选用波长 $\lambda = 10.6 \mu$ m 的 远红外激光作为大气激光通信的光源。根据式(2) 和式(3),对高斯光束在自由空间中的传播特性进行计算机仿真,得到激光束在不同距离的光功率分 布曲线,如图4所示。



different transmission distance

由图4可知,发射功率一定,随着传输距离的 增加,高斯光束的光功率分布趋于平坦,单位面积 内的光能量越来越少,对口径一定的接收天线而 言,接收到的光功率就减少了,这可以看作是激光 束在自由空间中的转播损耗。仿真结果表明,当 激光束传播距离达到10 km 时,接收端光斑的能 量峰值已经很低,可将其光功率分布近似看成是 均匀分布的。

根据式(3)和式(18),通过计算机仿真,得到经 卡式天线传输的激光束在传播过程中的光斑半径与 发射天线偏焦量的关系,如图5所示。





图 5 表明,发射天线偏焦使得出射光束的束腰 半径减小,加剧了激光束的发散,导致远场光斑的半 径增大,则激光束的能量变得分散。

根据前面的分析,得到不同程度偏轴下接收端 接收光能量的有效区域,如图6所示。



图 6(a) 表示表示光学收发天线系统之间的轴 对准情况,其接收端接收光能量符合理想状态;图 6 (b) ~(d)分别表示收发系统间存在一定的横向偏 移,且远场光斑与接收天线有部分相交;图 6(e)表 示随着收发天线系统间的横向偏移量继续增大,远 场光斑和接收天线不相交。

对卡式天线的偏轴特性进行计算机仿真,得到 位于10 km 处远场接收端的有效接收区域面积相对 值(与轴对准情况下有效接收面积的比值)随收发 系统间的横向偏移量的变化曲线,如图7所示。





由图 7 可知,接收端有效接收面积与收发系统 间的横向偏移量呈负相关,由于远场的光斑半径大 于接收天线口径,横向偏移量在一定程度内对有效 接收面积没有影响,随着横向偏移量的继续增大,远 场光斑与接收天线的相交部分减少,使得有效接收 面积减小,当偏移量增大到一定程度,远场光斑与接 收天线不再相交,有效接收面积为零。

4 应用研究

从前面的分析可知,在远距离自由空间光通信 中,发射天线的偏焦和收发天线系统之间的偏轴都 将会对接收端光功率造成一定影响,而偏焦和偏轴 往往同时存在且很难完全消除,因此,分析发射天线 偏焦和收发系统间偏轴共同作用对自由空间光通信 光传输能量损耗的影响显得尤为必要。

我们假定发送端光功率为 10000 mW,收发天线 结构相同,即口径 D = 150 mm,遮挡比 $\gamma = 0.2$ 的双 抛物面结构卡塞格伦光学天线,主镜和副镜的焦距分 别为 $f_1 = 100$ mm 和 $f_2 = 20$ mm,通过计算机仿真,得 到距离为 10 km 接收端光功率与发射天线轴向偏焦 和收发天线系统横向偏轴的关系,如图 8 所示。



图 8 接收端光功率与偏焦和偏轴的关系

Fig. 8 Relationship between optical power at the receiving end and defocus amount of transmitting antenna and the off-axis between the transmitting and receiving systems

图 8(a)表示在发射功率一定时,发射天线偏焦 和收发系统间偏轴取不同偏移量,所对应的远场接收 端的光功率。图 8(b)为接收端光功率的等高分布 图,平面内任一点的横纵坐标值分别对应一组发射天 线偏焦量和收发系统间偏轴量。接收端要求的最低 光功率对应的等高线,在其上任一组偏焦和偏轴取值 的组合下,接收端都恰好可以达到最低检测光功率, 即满足光通信传输能量要求的边界条件。给定一偏 焦量,纵坐标即表示在满足光功率要求条件下,收发 天线系统间允许的最大横向偏移量 δh_{max}。

仿真结果表明,发射天线的偏焦和收发天线系 统间的偏轴都对接收端光功率造成影响。一方面, 发射天线焦点在轴向上的偏移程度越大,激光束的 发散就越严重,能量不能很好地集中,导致接收端检 测到的光功率降低;另一方面,随着收发系统之间偏 轴的增大,接收端有效接收区域面积将减小,使得接 收到的能量减少。

值得注意的是,当收发天线系统之间存在偏轴 且一定时,发射天线偏焦在一定范围内可以增大接 收端的光功率。

我们对收发系统间横向偏移量 δh 取固定值时, 不同程度偏焦下接收端的光功率进行研究,得到收 发系统间横向偏移量一定时,接收端接收到的光功 率与发射天线偏焦的关系曲线,如图9所示。



图 9 偏轴一定时接收端光功率与发射天线偏焦的关系 Fig. 9 Relationship between optical power of the receiving terminal and defocused amount of transmitting antenna with off-axis remains unchanged

分析结果表明,当收发天线系统间的横向偏移 量增大到一定程度时,接收端光功率与发射天线偏 焦在一定范围内呈正相关,即在一定范围内,随着偏 焦的增大,接收端光功率增加。

为了进一步探究发射天线偏焦与收发系统间偏 轴的关系,我们对仿真实验数据进行分析,得到接收 端最低检测光功率 *P*_{min}要求下,满足最低检测功率 时,发射天线不同偏焦量对应的收发系统之间允许 最大偏轴量 δh_{max}。我们发现,当接收端最低检测光 功率一定时,发射天线偏焦在一定范围内能够增大 收发天线系统之间的允许最大横向偏移量,且存在 一个偏焦的量值使得收发系统间的允许最大横向偏 移量达到最大值。

我们对实验数据进行分析,得到不同最低检测 光功率情况下发射天线偏焦量达到最大值点时收发 系统间的最大横向偏移量及其增幅,如表1所示。

表1 不同接收端最低光功率要求下的实验数据 Tab. 1 Experimental data under different requirements of the minimum optical power of the receiving end

P _{min} /mW	$\delta = 0$ $\delta h_{\text{max}} / \text{mm}$	δ _{max} ∕mm	$\delta = \delta_{\max}$ $\delta h_{\max} / mm$	$\delta\eta$ ($\delta h_{ m max}$)	$\delta\eta$ (δS)
50	495.9	6.96	628.5	+26.74%	+ 60. 63%
60	491.1	6.36	597.7	+21.71%	+48.12%
70	486.4	5.75	572.9	+ 17. 78%	+ 38. 73%
80	482.0	5.35	552.6	+ 14. 65%	+31.44%
90	477.6	5.15	535.2	+12.06%	+25.58%
100	473.2	4. 74	519.9	+9.87%	+20.71%

由表1可知,在接收端探测器要求最低检测光 功率为50 mW的情况下,当发射天线未发生偏焦 时,收发天线系统间的允许最大偏轴量为495.9 mm,当发射天线焦点偏移6.96 mm,收发系统之间 的允许最大偏轴量达到最大值,为628.5 mm,允许 最大偏轴量比未偏焦的情况增加了26.74%,满足 接收端光功率要求下收发天线系统间允许横向偏移 区域(即以允许最大横向偏移量为半径的圆)的面 积增加60.63%。

可见,在大气激光通信中,通过调节发射天线使 其偏焦到一定量值可以增大收发天线系统间的允许 最大横向偏移量,进而增大了收发天线系统之间允 许横向偏移的区域,这有效地降低了远距离激光通 信中目标接收端捕获的难度,有助于改善远距离激 光通信的目标捕获效率。

5 结 论

本文对大气激光通信中的光传输能量损耗进行 理论分析,重点研究了影响远场接收端光功率的几 个主要因素,并进行了综合性仿真和应用研究。研 究表明:在远距离激光通信中,发射天线的偏焦和收 发天线系统间的偏轴都将造成接收端的能量损耗。 偏焦,将加剧激光束的发散,使远场的光斑扩大、能 量分散;偏轴,将导致远场接收端有效区域减小。在 此基础上进一步研究了诸要素共同作用对光传输能 量损耗的影响,着重探讨了发射天线偏焦和收发天 线系统间横向偏移的关系。应用研究表明:通过调 节发射天线在一定范围内偏焦可以有效增大收发天 线系统间的允许最大横向偏移量,增大收发系统间 允许的横向偏移区域,这将有效降低远距离激光通 信中目标接收端的捕获效难度,达到改善远距离光 通信中目标捕获效率的目的。

参考文献:

- [1] WANG Junsheng, TIAN Bo, CUI Yiping. Free space laser communication technology [J]. Journal of Electron Devices, 2005, 28(1):91-96. (in Chinese) 王俊生,田波,崔一平.大气激光通信技术[J]. 电子器件, 2005, 28(1):91-96.
- [2] WANG Rongrui. Situation of space laser communication
 [J]. Laser & Infrared, 1984, 14(6):21-22. (in Chinese)
 王戎瑞. 空间激光通信现状[J]. 激光与红外, 1984, 14
 (6):21-22.
- [3] WANG Jia, YU Xin. Free-space optical communication's current situation and development trend [J]. Optical Technique, 2005, 31(2):259-262. (in Chinese) 王佳, 俞信. 自由空间光通信技术的研究现状和发展 方向综述[J]. 光学技术, 2005, 31(2):259-262.
- [4] Vallone G, Dequal D, Tomasin M, et al. Interference at the single photon level along satellite-ground channels [J].
 Physical Review Letters, 2016, 116(25):360IV.
- [5] LI Yuquan, ZHU Yong, WANG Jiangping. Optical communication theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
 李玉权,朱勇,王江平.光通信原理与技术[M].北京: 科学出版社,2006.
- [6] CHEN Haiyan. Principle and technology of laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016. (in Chinese)

陈海燕.激光原理与技术[M].北京:国防工业出版社,2016.

- [7] HE Wensen, YANG Huajun, JIANG Ping. Research on laser beam propagation characteristic of cassegrain optical antenna[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(3): 280 284. (in Chinese)
 何文森,杨华军,江萍.卡塞格伦光学天线光传输特性研究[J].激光与红外, 2014, 44(3): 280 284.
- [8] YAN Jixiang, et al. Matix optics [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1995. (in Chinese)
 阎吉祥,等. 矩阵光学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995.
- [9] WANG Ze, WANG Jingyuan, XU Zhiyong, et al. Long wavelength infrared free-space optical communication technology[J]. Journal of Military Communications Technology, 2014, (4):37-42. (in Chinese)
 王喆,汪井源,徐智勇,等. 远红外自由空间光通信技术[J]. 军事通信技术, 2014, (4):37-42.