

# 自由空间光通信链路最优束散角分析

张慧颖

(吉林化工学院信息与控制工程学院,吉林 吉林 132022)

**摘要:**讨论了FSO通信系统链路最优束散角问题。由空间光通信链路方程得出,减小束散角会增大通信链路裕量。在未对准误差情况下,深入分析偏移角、束散角与链路裕量之间的关系;假设未对准损耗是链路裕量的唯一影响因素的条件下,通过推导得出最大偏移角表达式,当未对准(偏移)角度取得最大值时对应的便是最优束散角。由仿真分析可知,偏移角度的增大导致系统接收光功率减小;对于该系统光束束散角处于1.6 mrad时便是最优束散角。该部分内容研究为对星地的上行和下行通信链路功率计算提供了理论支撑。

**关键词:**FSO;偏移角;最优束散角;链路裕量

**中图分类号:**TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.015

## Analysis of optimal beam divergence angle of free space optical communication link

ZHANG Hui-ying

(College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

**Abstract:**The optimal beam divergence angle of FSO communication system is discussed in this paper. According to the spatial optical communication link equation, the communication link margin increased with the beam divergence angle reduced. Under the misalignment error, the relationship between offset angle, beam divergence angle and link margin is analyzed. Assuming that the misalignment loss is the only factor affected the link margin, the maximum offset angle expression is derived. When the unaligned(offset) angle reaches its maximum value, the angle is optimal beam divergence angle. The simulation results show that the optical power decreased with the deviation angle increased. when the beam divergence angle of the system is 1.6 mrad, it is the optimal beam divergence angle. This research provides theoretical support for the uplink and downlink communication link power calculation.

**Key words:**FSO; offset angle; optimal beam divergence angle; link margin

### 1 引言

空间光通信系统的实质是能量/功率传输,链路预算分析是分析空间光通信系统的一个重要环节。空间光通信链路预算描述的是光束从发射机到接收机之间链路上的功率水平。空间激光通信系统有三个独立的链路,即通信链路、精跟踪链路和捕获(粗跟

踪)链路。因此,需要对捕获链路的功率、跟踪链路的功率及通信链路(包括上行和下行)的功率加以分析<sup>[1-2]</sup>。当三个链路的功率分析均满足系统要求,系统才能可靠、工作。当信号在星地链路中进行传输时,大气吸收、大气闪烁和大气湍流现象降低了通信链路性能<sup>[3-7]</sup>;此外,上行链路和下行链路的噪

基金项目:吉林省教育厅项目(No. JJKH20180561KJ)资助。

作者简介:张慧颖(1982-),女,博士,副教授,主要研究方向为光通信,无线通信等。E-mail:yingzi1313@163.com

收稿日期:2018-12-26;修订日期:2019-01-21

声以及振幅和相位随机变化导致的信号失真,大大降低了通信链路的性能<sup>[8]</sup>。因此,对通信链路功率分析尤为重要。

### 2 通信链路模型

通常情况下,在远距离自由空间光通信中,假设激光光束是恒定功率分布且以衍射极限角发射。链路中除发射光学单元损耗、接收光学单元损耗、非自由空间信道额外功率损耗和 APT 对准失配损耗外,其余链路损失是因为有效接收口径仅能接收部分远场激光功率。若满足激光束具有较小的出射平面角时,则链路传输方程可表示为<sup>[9-11]</sup>:

$$P_r = P_t \cdot \eta_{tx} \cdot \eta_s \cdot \eta_{rx} \cdot e^{-8(\theta_{off}/\theta_t)^2} \cdot \left(\frac{D}{\theta_t L}\right)^2 \quad (1)$$

式中,  $P_r$  为接收功率;  $P_t$  为发射功率;  $\eta_{tx}$  为发射光学单元的效率(透过率);  $\eta_s$  为信道引起的功率损失,对于 FSO 系统其值近似为 1;  $\eta_{rx}$  表示接收光学单元损耗;  $\theta_t$  定义为激光光束的束散角;  $\theta_{off}$  为离轴角度,对于实际系统对应跟踪误差;  $D$  为接收光学天线口径。由式(1)可看出,接收到的功率与束散角有关,下面具体分析束散角对功率预算的影响。

### 3 最优束散角推导

标准 FSO 系统发射机和接收机处于绝对对齐位置。 $\theta_d$  表示发射光束和接收光束之间由于各种恶化因素而引起的偏移(未对准)角度;  $\theta_{d,max}$  表示所允许的最大值;  $\theta_t$  为发射机束散角(半角)。理想状态下  $\theta_d = 0$ , 系统取得最好性能<sup>[12]</sup>。本文在最低阈值 BER( $10^{-8}$ )时,分析最大允许束散角。FSO 框图如图 1 所示。

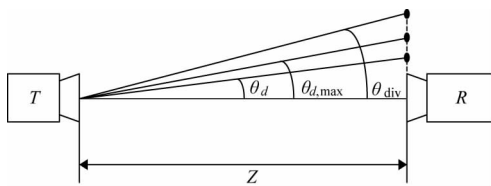


图1 FSO 系统结构框图

Fig.1 Block diagram of FSO system

激光束经过不同链路衰减后接收到的光功率为  $P_r$ ;  $A_t$  表示光学发射天线损耗;  $A_{geo}$  为几何损耗;  $A_{atm}$  表示大气衰减;  $A_r$  表示接收光学天线损耗;  $P_r$  为接收到的总功率;  $P_{min}$  表示接收机灵敏度<sup>[13-14]</sup>。则有:

$$P_r = P_t - A_r - A_t - A_{geo} - A_{atm} \quad (2)$$

通信链路裕量为:

$$M = P_t - P_{min} - A_r - A_t - A_{geo} - A_{atm} \quad (3)$$

将光束在传播方向上产生偏移定义为未对准损耗( $A_{mis}$ )。为简化分析,假设未对准损耗是链路裕量的唯一影响因素,则有:

$$M_\theta = M - A_{mis} \quad (4)$$

式(4)中,  $M_\theta$  表示未对准损耗下的链路裕量,取决于未对准角度。而由高斯光束引起的未对准损耗为:

$$A_{mis} = 8.686 \left(\frac{\theta_d}{\theta_t}\right)^2 \quad (5)$$

为获得较高的通信指标,需要寻找最优的束散角,使得未对准损耗下链路裕量  $M_\theta$  为 0。即:

$$M - A_{mis} = 0 \quad (6)$$

当  $M_\theta = 0$  意味着所有的链路裕量用于弥补未对准损耗,此时,最优束散角  $\theta_t$  对应的偏移角取得最大值  $\theta_d = \theta_{d,max}$ 。将以上分析代入式(2)和式(3),计算出最大偏移角为:

$$\theta_{d,max} = \left( \sqrt{\frac{P_t - P_{min} - A_r - A_t - A_{geo} - A_{atm}}{8.686}} \right) \cdot \theta_t \quad (7)$$

### 4 仿真分析

在 Matlab 平台上完成仿真分析。设透明度系数  $\tau = 0.8$ ; 激光器波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ; 传输距离  $z = 10 \text{ km}$ ; 接收口径  $D = 30 \text{ cm}$ ; 发射功率  $P_t$  为 10 dBm; 能见度海拔 5 km 时为 10 km; 传输数据速率为 10 Gbps、误码率为  $1 \times 10^{-8}$  时,接收功率  $P_{min}$  为 -38.67 dBm。束散角变化时,未对准角度和链路裕量关系曲线如图 2 所示。

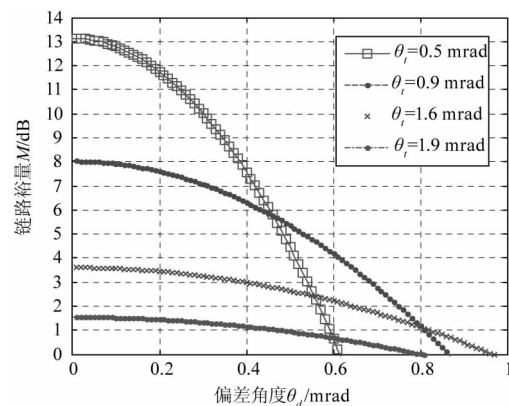


图2 偏差角度和链路裕量关系曲线

Fig.2 Deviation angle and link margin curve

由图 2 看出,随着偏移角度增加,系统链路裕量

呈现明显下降趋势;当偏移角达到最大值即  $\theta_{d,max}$  时,链路裕量几乎为0,意味着链路裕量全部被损耗掉,可能造成系统不能正常通信。因此,光束发散角严重影响链路裕量。当偏移角  $\theta_d$  为 0.3 mrad 时,束散角为 0.5 mrad、0.9 mrad、1.6 mrad 和 1.9 mrad 时对应的链路裕量分别为 10 dB、7 dB、3.3 dB 和 1.4 dB,说明光束发散角增大导致系统链路裕量减小。但是当  $\theta_i = 0.5$  mrad 时,所得的最大偏移角约为  $\theta_{d,max} = 0.62$  mrad;当束散角增大时,对应的  $\theta_{d,max}$  分别取到 0.85 mrad、0.96 mrad 和 0.8 mrad,这说明在一定的束散角范围内,偏移角度的最大值随着束散角的增大而逐渐增大;但是当束散角增大到一定角度后,最大偏移角反而减小。由此得出,  $\theta_i = 1.6$  mrad 应是本系统的最优束散角。保持以上仿真参数不变,束散角与最大偏移角间仿真结果如图 3 所示。

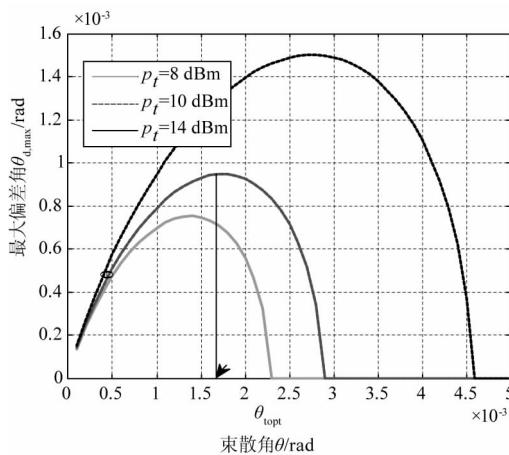


图3 束散角与最大偏差角关系曲线

Fig. 3 Beam divergence angle and maximum deviation angle relation curve

由图 3 可知:发射光束束散角的增大会引起未对准角度的增大,但是当增大到最大值后反而减小,此时,取得最大偏移角度  $\theta_{d,max}$  所对应的束散角  $\theta_i$  便是最优束散角,此结论与上面理论分析结果完全吻合。观察图 2 看出,在发射功率为 10 dBm 时,最大偏移角取得  $\theta_{d,max} = 0.95$  mrad,对应的束散角应是最优束散角  $\theta_{opt}$ ,该值在 1.6 mrad 左右,与上面分析结论一致。本文所涉及的 FSO 系统的发射波长为 1550 nm,在光束束散角处于 1.6 mrad 时获得最大未对准(偏移)角度。当激光器的发射波长改变时,所分析的结果均发生改变。理论上,最大的偏移角度应随波长的增大而增大,由于波长增加或减小影

响几何损耗  $A_{geo}$ ,在此不对其做分析。当最佳束散角 1.6 mrad、未对准角度在 0.5 mrad 时,讨论几何损耗对系统功率损耗。

由图 4 看出,当接收孔径  $D$  越小时,引起的几何损耗增大,则系统功率损耗越大;链路损耗的增加会使系统裕量减小。因此,在设计时,可以通过适当增大接收孔径的方法抑制大气闪烁、提高系统的功率裕量,从而改善 FSO 系统的通信性能。

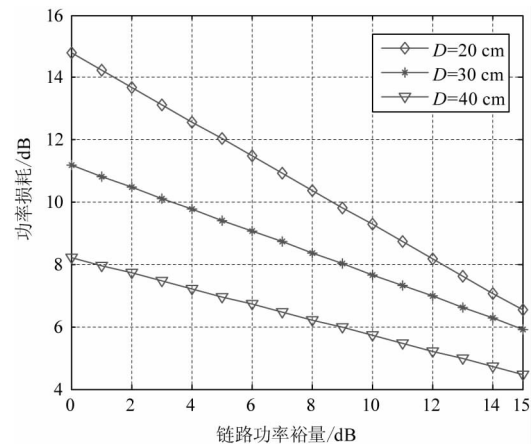


图4 链路损耗与链路裕量关系曲线

Fig. 4 Link loss and link margin relation curve

## 5 结论

本文首先对链路方程进行分析。通过分析得出,束散角的减小也会增大链路的裕量。在未对准误差条件下,深入分析偏差角度、束散角与链路裕量之间的关系,通过推导得到最大偏差角表达式。由仿真分析可知,偏移角度的增大导致系统接收光功率减小;取得最大偏移角度所对应的束散角便是最优束散角,对于本系统束散角为 1.6 mrad 便是最优束散角,此时系统获得较好的性能指标;链路损耗的增加会使系统裕量减小。因此,在设计系统时,在最优束散角的条件下,可以通过适当增大接收孔径的方法抑制大气闪烁、提高系统的功率裕量。该部分内容研究为对星地的上行和下行通信链路功率计算提供了理论支撑。

## 参考文献:

- [1] YU Lintao, SONG Lu, HAN Chen, etc. Analysis and simulation of link power and communication performance in space-ground optical communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 543 - 547. (in Chinese)

于林韬,宋路,韩成,等.空地激光通信链路功率与通

- 信性能分析与仿真[J]. 光子学报, 2013, 42(5): 543-547.
- [2] LB Stotts, P Kolodzy, A Pike, et al. Free-space optical communications link budget estimation[J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5333-5343.
- [3] ZHANG Changsen, LIU Baoju. Influence of atmospheric factors on the transmission of the laser beam[J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(11): 1605-1607. (in Chinese)  
张长森, 刘保菊. 激光通信系统中各效应对激光信号传输影响的研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1605-1607.
- [4] XING Jianbin, XU Guoliang, ZHANG Xuping, et al. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 34(12): 1850-1852. (in Chinese)  
邢建斌, 许国良, 张旭莘, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2004, 34(12): 1850-1852.
- [5] LI Hongsong. Optical communication principle and system[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)  
黎洪松. 光通信原理与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [6] YANG Di. Effect of atmospheric turbulence scintillation on laser communication system and compensation technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)  
杨迪. 大气湍流闪烁效应对激光通信系统影响及补偿技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [7] CHEN Mu, KE Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 108-114. (in Chinese)  
陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 108-114.
- [8] CHEN Haiyan, LIU Wei, LI Li. Effect of relative phase noise on performance of coherent optical communication system[J]. Laser Technology, 2016, 40(1): 94-98. (in Chinese)  
陈海燕, 刘威, 李莉. 相对相位噪声对相干光通信系统性能影响[J]. 激光技术, 2016, 40(1): 94-98.
- [9] Xie Hua, Heckman David, Breidenthal Julian. Link characterization for deep-space optical communications[J]. Interplanetary Network Progress Report, 2016, 42(205): 1-33.
- [10] ZHAN Weida, LI Hongzuo, WANG Zhijian, et al. Link identity analysis and power budget for deep space optical communication[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural science edition, 2011, 12(5): 55-60. (in Chinese)  
詹伟达, 李洪祚, 王志坚, 等. 深空光通信链路特性分析及功率预算[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(5): 55-60.
- [11] JIANG Huilin. Space laser communication technology and system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. (in Chinese)  
姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [12] SUN Feng, DENG Daizhu, XIONG Hui, et al. Performance simulation of atmospheric laser communication link[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(5): 5-7. (in Chinese)  
孙峰, 邓代竹, 熊慧, 等. 大气激光通信链路的性能仿真[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(5): 5-7.
- [13] AN Yan, XU Yiyun, DONG Keyan, et al. Energy analysis and test of close laser communication link[J]. Laser & Infrared, 2018, (12): 1526-1530. (in Chinese)  
安岩, 许燧赟, 董科研, 等. 近距离激光通信链路能量分析与试验[J]. 激光与红外, 2018, (12): 1526-1530.
- [14] AN Yan, XU Yiyun, DONG Keyan, et al. Influence of alignment error in laser communication[J]. Optical communications technology, 2018, (8): 48-51. (in Chinese)  
安岩, 许燧赟, 董科研, 等. 激光通信中对准误差的影响[J]. 光通信技术, 2018, (8): 48-51.