

文章编号 1004-924X(2002)05-0493-04

影响激光大气通信距离的诸因素分析

徐晓静,元秀华,黄德修

(华中科技大学 光电子工程系,湖北 武汉 430074)

摘要:激光大气通信技术由于具有宽带大容量、低成本、无需频率许可等优点,近几年来作为一种新的宽带无线接入方式受到人们的广泛关注。激光大气通信距离受多种因素的制约,通常仅数公里。本文在建立激光大气通信系统数学模型的基础上,分析了激光束发散角、大气衰减、激光发射功率以及探测器灵敏度对通信距离的影响,结果显示较窄的光束发散角、较高的探测器灵敏度有利于通信距离的延长,而通过提高激光发射功率来延长通信距离的办法不可取,从而为系统设计提供参考依据。

关键词:激光大气通信;通信距离;损耗

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A

1 引言

随着半导体激光器和光电探测器件的日益完善以及光通信技术的发展,激光大气通信技术在沉默十余年之后又悄然复兴^[1]。由于它结合了光纤通信以及微波等传统无线通信的优势,具有宽带高速、低成本、安装方便快捷、通信安全保密、无需频率许可等优点,因而成为一种新兴的宽带无线接入方式受到人们的广泛关注。它能有效解决接入网的瓶颈问题,现阶段具有广阔的市场前景^[2]。激光大气通信距离受到很多因素的制约,如激光束发散角、大气衰减、激光发射功率以及探测器灵敏度等,本文通过建立激光大气通信系统数学模型,具体分析了这些因素对通信距离的影响,从而为激光大气通信系统的设计提供参考依据。

2 激光大气通信系统数学模型

激光大气通信系统主要由光源及调制电路、发射光学系统、接收光学系统、探测器及解调电路等部分组成。由于光信号通过自由空间传输,因而存在较大的传输损耗,故系统必须采用大功率激光器作为光源。半导体激光器由于体积小、重

量轻、电光转换效率高、寿命长、易于调制等优点而成为激光大气通信光源的首选。但是半导体激光器的光束发散角较大,且光斑为椭圆形,因而通常需由光学系统对其进行准直和整形,压缩发散角。而在接收端再通过光学系统将光信号会聚至探测器表面。

针对激光大气通信的特点,我们设计采用808nm的量子阱激光器作信号光源,调制速率为155Mbit/s,由伽利略望远镜及其他一些必要的光学元件作激光发射和接收光学系统,望远镜口径为80mm,接收探测器为PIN光电二极管。

当收发两端距离为 z 时,该系统对应的激光自由空间传输方程可表示如下:

$$P_r(z) = P_t \cdot \tau \cdot \rho \cdot (z, \theta) \cdot A \cdot \eta(z), \quad (1)$$

式中, $P_r(z)$ 为 z 处的接收光功率; P_t 为发射光功率;系统采用OOK直接检测方式, P_r 必须位于探测器动态范围之内系统才能正常通信,这可以通过反馈控制电路自动调节激光器发射光功率 P_t 来实现; τ 和 ρ 分别是发射和接收光学系统的透过率; (z, θ) 是由光束扩展导致的接收效率,其中 θ 为光束发散角; A 是瞄准误差产生的接收效率变化量; $\eta(z)$ 为大气透过率,它与大气衰减系数 α (dB/km)的关系为:

$$\eta(z) = 10^{-\frac{\alpha z}{10}}, \quad (2)$$

由(1)和(2)式可以看出 η 、 τ 、 P_t 以及探测器灵敏度 P_{\min} 变化时系统的最大通信距离 z 将发生改变,下面分别讨论这 4 个参数对通信距离的影响程度。

3 光束发散角对通信距离的影响

3.1 光束扩展损耗

激光束经发射光学系统准直以后,光束发散角一般可达到 1mrad 以下。尽管如此,当光束传输几公里以后,在远场会形成一个大的光斑,如果接收光学系统的口径小于此光斑的直径,信号光束就不能全部被探测器接收,即产生光束扩展损耗(geometrical spreading loss)^[3],从而限制通信距离。显然,激光发散角越小,光束扩展损耗就越小。激光是一种高斯光束,其光束截平面的光强分布如下^[4]:

$$I(r, z) = I_0 \exp[-(\frac{r}{w(z)})^2], \quad (3)$$

式中, r 为截面上一点到 z 轴的距离, $w(z)$ 为高斯光束的截面半径,它可以表示为:

$$w(z) = w_0 [1 + (\frac{z}{z_0})^2]^{1/2}, \quad (4)$$

其中, w_0 为高斯光束的束腰半径, λ 为激光波长。

当高斯光束离开束腰较远时,其远场发散角为:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2w(z)}{z} = 2 \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad (5)$$

当 $z \gg \frac{z_0^2}{\lambda}$ 时, z 处光斑半径可以表示为

$$w(z) \approx z \cdot \theta / 2, \quad (6)$$

假设接收望远镜正处于接收端光斑中心,那么接收光功率占接收端光斑功率的比率为

$$\eta(z, \theta) = \frac{\int_0^{D/2} I_0 \exp[-2(\frac{r}{z \cdot \theta / 2})^2] r dr}{\int_0^{\infty} I_0 \exp[-2(\frac{r}{z \cdot \theta / 2})^2] r dr}, \quad (7)$$

式中, D 为望远镜口径,则光束扩展损耗为

$$A_s(z, \theta) = -10 \lg \eta(z, \theta), \quad (8)$$

本系统中 $D = 80\text{mm}$,则光束扩展损耗与通信距离和光束发散角的关系如图 1 所示。

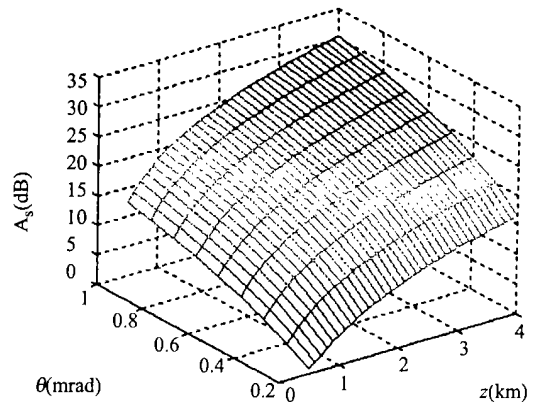


图 1 光束扩展损耗与传输距离和光束发散角的关系
Fig. 1 Relationship between geometrical spreading loss and z as well as θ .

3.2 附加损耗

收发两端对准时不可避免地会存在一定的瞄准误差^[5],它将导致接收望远镜的中心偏离光斑中心。由于激光的远场光强为高斯分布,而非均匀分布,因此瞄准误差将导致接收光功率下降,即产生附加损耗。我们用数值分析的方法估算了附加损耗的大小。假定光束发散角为 0.2mrad,通信距离为 1km 时,60 μ rad 的瞄准误差会产生约 3dB 的附加损耗,通信距离增加时,附加损耗减小。因此为简化计算,在后面的分析中,均假定附加损耗最大值为 3dB。即 $A_a = 50\%$ 。

3.3 光束发散角对通信距离的影响

假设 τ 、 η 均为 40%, $P_t = 50\text{mW}$,若探测器灵敏度 P_{\min} 为 1 μ W,令 $A_a = 5\text{dB/km}$,将式(2)和(7)代入(1)式,当 $P_r = P_{\min}$ 时,系统通信距离达到最大值,由此可得系统最大通信距离 z 与光束发散角的关系如图 2 所示。随着 θ 的减小,通信距离逐渐增大。因此尽可能压缩光束发散角可以获得较长的通信距离,这是通过对光学系统进行优化设计来实现的。

4 大气衰减对通信距离的影响

由(2)式可知,大气透过率由大气衰减系数和传输距离 z 决定,而 τ 在不同天气条件下的变化范围很大,如极晴朗时为 0.5dB/km,薄雾天为 7dB/km 左右,而浓雾天可达到 315dB/km^[3],因此大气衰减系数的大小会极大地影响通信距离的

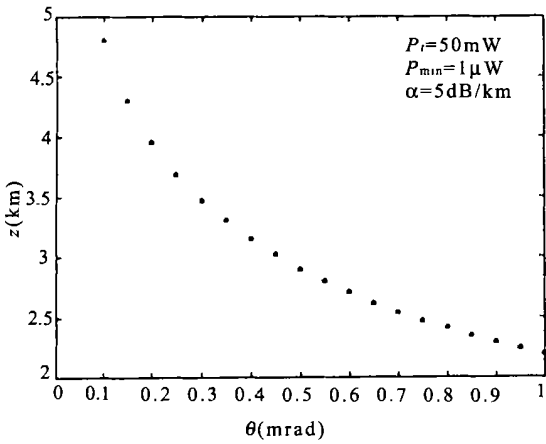


图 2 最大通信距离与光束发散角的关系

Fig. 2 Relationship between the largest link range and beam divergence.

长短。假设 $\theta = 0.2\text{mrad}$, 通信系统其他参数如前所述, 根据 (1)、(2) 和 (7) 式可求出 z 与 α 的关系, 如图 3 所示。当天气由晴变阴时, 系统最大通信距离急剧减小, 而当 $\alpha > 15\text{dB/km}$ 以后, 系统的通信距离变化缓慢, 在 1km 左右。

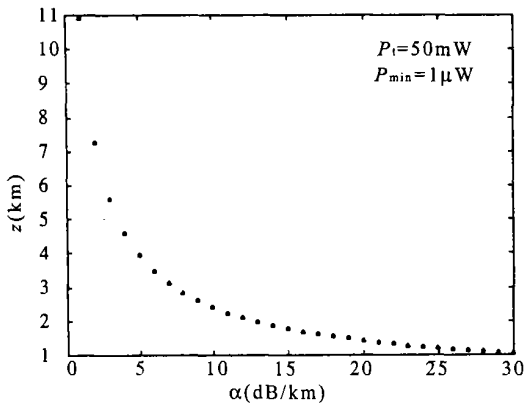


图 3 最大通信距离与大气衰减系数的关系

Fig. 3 Relationship between the largest link range and atmospheric attenuation.

5 激光发射功率对通信距离的影响

根据 (1) 式可以看出, 当 P_r 值发生变化, 而其他参数值固定时, 系统的最大通信距离也会发生一定的变化。假设光束发散角 θ 和探测器灵敏度 P_{\min} 均同前, 令 α 分别为 $1, 5, 10\text{dB/km}$, 以 P_r 为自变量, 由 (1)、(2)、(7) 式求出系统对应的最大通信距离与发射光功率的关系, 如图 4。可见, 最大

通信距离随发射光功率增加而增大, 但当 P_r 增到一定值后, z 的增加渐趋缓慢, 说明发射功率达到一定程度以后对通信距离的影响减小。所以单纯靠提高发射光功率的办法并不能有效增大通信距离, 并且代价太高, 因为随着发射功率的增大, 半导体激光器的调制和制冷都会变得很困难。而且随着 α 的增大, 即天气恶化时 z 增加的趋势更慢。

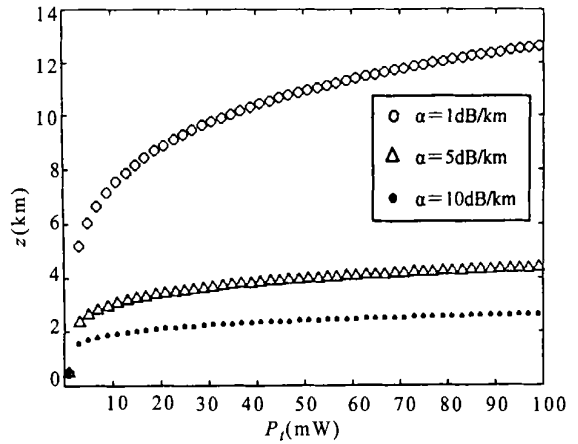


图 4 最大通信距离与发射光功率的关系

Fig. 4 Relationship between the largest link range and laser power.

6 探测器灵敏度对通信距离的影响

最后考察一下探测器灵敏度发生变化时, 会对通信距离造成什么样的影响。令 $P_r = 50\text{mW}$, $\theta = 0.2\text{mrad}$, $\alpha = 5\text{dB/km}$, 改变 P_{\min} , 当 $P_r =$

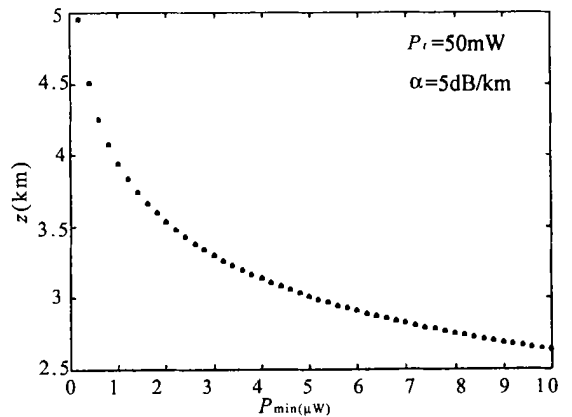


图 5 最大通信距离与探测器灵敏度的关系

Fig. 5 Relationship between the largest link range and detector sensitivity.

P_{\min} 时,由(1)式可得系统最大通信距离与探测器灵敏度的关系如图 5 所示。可见,随着灵敏度的提高(即 P_{\min} 减小),通信距离呈增大趋势,而且增大的速度逐渐变快,因此,提高接收机灵敏度是增大通信距离的一个良好途径,在选择器件时应尽量选择灵敏度高的探测器。

7 结 论

本文分析了光束发散角、大气衰减系数、激光

发射功率以及探测器灵敏度等不同参数对激光大气通信距离的影响程度,在天气状况一定时,较窄的光束发散角以及较高的探测器灵敏度能有效延长系统最大通信距离。而相比之下,提高激光发射功率对延长通信距离的效果不佳。因此在设计激光大气通信系统时应选择性能优良的光学系统对激光束进行准直,并采用灵敏度高的光电探测器。

参考文献:

- [1] 邹自立. 悄然复兴的激光大气通信技术[J]. 光通信技术, 1997, 21(3):167-170.
- [2] Fuller M. Free-space optics 'available' for the last mile? [J]. *LightWave*, 2000, 17(8):1-2.
- [3] Kim I I, Stieger R, Koontz J A, *et al*. Wireless optical transmission of fast Ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink Laser communication system[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(12):3143-3155.
- [4] 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- [5] Arnon S Rotman S R. Beam width and transmitter power adaptive to tracking system performance for free-space optical communication[J]. *Applied Optics*, 1997, 36: 6095-6101.

Analysis of the parameters influencing the distance of free-space laser communication

XU Xiao-jing, YUAN Xiu-hua, HUANG De-xiu

(Dept. of Optoelectronic Engineering, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract : Free-space laser communication is becoming attractive as a new wideband wireless access technology in recent years by virtue of its many advantages, such as high-bandwidth, low cost and being license-free. Laser beam can only travel a few kilometers through the atmosphere because of some limiting factors. Based on the mathematical model of free-space laser communication, this article analyses the effects of beam divergence, atmospheric attenuation, laser power and detector sensitivity on the link range. The results show that it is effective to extend the range by narrower beam divergence and higher detector sensitivity, and higher laser power is unadvisable. The analyses in this paper are helpful for system design.

Key words : free-space laser communication; link range; optical loss

作者简介:徐晓静(1974 -)女,湖北省人,华中科技大学硕士研究生,研究方向:光无线接入技术;
元秀华(1957 -)男,湖南省人,华中科技大学光电子工程系教授;
黄德修(1937 -)男,湖南省人,华中科技大学光电子工程系教授,博导。