

# TDRSS激光空间链路光功率设计

田江\* 邱琪 龙祖利

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**从光功率的角度,分析了卫星间长距离和出射光束发散角产生的空间传输损耗,当传输速率增加、误码率上升时,接收机灵敏度下降;讨论了不同卫星数目时传输损耗与激光束发散角的关系,在考虑其他光功率开销后,得出了发射光功率,发散角和接收灵敏度相互制约关系。

**关键词** 光功率; 空间光通信; 跟踪与数据中继卫星系统; 发散角; 接收灵敏度

中图分类号 TN914 文献标识码 A

## Optical Power Analysis of Space Laser Link in TDRSS

Tian Jiang Qiu Qi Long Zuli

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper introduces the properties of optical power budget in TDRSS's laser communication links. For various condition of different transmission distance and divergence angle, the attenuation in space is studied in detail. According to the requirement of TDRS system, the transmitting power is also specified in the paper.

**Key words** optical power; space laser communication; TDRSS; divergence angle; receiving sensitivity

为低轨道飞行体(LEO)提供跟踪与数据中继服务的TDRSS卫星运行在静止卫星轨道上,通信的信道为真空。在真空中,不存在介质的吸收、反射与散射的损耗,也没有介质材料色散与非线性效应的限制,由于光波长比微波低几个数量级,光束发散带来的损耗也相对较低,因此,使用激光通信链路是最佳的选择。空间激光通信具有设备体积小、重量轻、功耗低的特点,光波在真空中传播时,没有色散对传输速率的限制,也没有非线性效应对光功率密度的限制,而光功率损耗大,无法提供中继,所以对光功率容限提出了较高的要求。星间激光链路是一个损耗限制的光通信系统,其中光功率大小是一个非常重要的参数,本文基于光功率,分析TDRSS中发射光功率、光束发散角和接收灵敏度对系统的限制因素。

### 1 理论基础

从发射机出来的激光光束,以一定的发散角射向接收卫星,经过长距离传输后,光斑尺寸显著扩大,降低了接收机上的光功率密度。在系统传输码率和误码率的要求下,接收机有一最小可接收光功率,为建立可靠的通信链路,最终到达探测器的接收功率必须大于接收机灵敏度。

#### 1.1 自由空间传输损耗

自由空间的传输损耗是由传输距离和发散角造成的,首先应确定传输距离。TDRSS星工作在静止卫星轨道上,理论上三颗这样的卫星就可以覆盖地球上空除极地外的大部分区域,但是在覆盖区域的交界处,

2002年11月26日收稿

\* 男 23岁 硕士 主要从事光通信与空间光通信技术方面的研究

由于对卫星的高度角很小,有效接收面积小,能量密度较低,对接收机灵敏度的要求较高,所以实际系统应用的卫星数多于三颗,如六或九颗。根据卫星轨道高度、地球半径和卫星数可以求出准确的星间距离 $R_0$ ,即通信的传输距离。

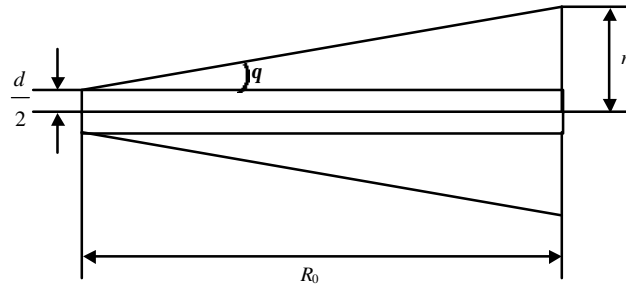


图1 发散损耗示意图

如图1所示,从发射机出来的激光束的光斑半径为 $d/2$ ,光束发散角为 $q$ ,经过 $R_0$ 的空间传输后,在接收机处的光斑半径扩大到 $r$ 。假设空间没有任何损耗,则光斑面积扩大带来接收面的光功率密度降低,因此,若光功率分布均匀,发散损耗就是接收机的尺寸与光斑尺寸的比值。卫星光通信的发射透镜组和接收透镜组通常是共用的,接收机可接收的有效光束半径也是 $d/2$ ,则损耗

$$L_s = \frac{\pi(d/2)^2}{\pi r^2} \quad (1)$$

扩散到接收机处的光斑半径

$$r = \frac{d}{2} + R_0 \operatorname{tg} q \quad (2)$$

发散角 $q$ 需要尽可能小的量,但由于受衍射极限的限制,即使平行光通过一个有限大小(直径 $d$ )的孔径,也会有极小发散角

$$q_0 = \frac{1.22\lambda}{d} \quad (3)$$

为降低损耗,要压缩发散角,从理论上发散角一定大于衍射极限,即 $q > q_0$ 。

## 1.2 最小接收光功率的确定

最小光功率是在满足一定误码率要求下,探测器所需要的最小平均接收光功率。如果传输速率大,每秒钟的脉冲数目多,则每个脉冲含有的光子数和光能量会降低,误码率就会上升。所以当速率变大时,在误码率的要求下,最小接收光功率上升,即灵敏度下降<sup>[1]</sup>。

接收机的误码率与接收机的 $Q$ 参数有关。 $Q$ 参数定义为

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{s_1 + s_0} \quad (4)$$

式中  $I_1$  和  $I_0$  分别为“1”码和“0”码的电流;  $s_1$  和  $s_0$  分别为“1”码和“0”码的噪声。

采用最佳判决电流时,误码率

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

接收机总噪声

$$s^2 = s_s^2 + s_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + (4K_B T / R_L) F_n \Delta f \quad (6)$$

式中的 $s_s$ 和 $s_T$ 分别为接收机点噪声和热噪声,当接收的光功率很小时, $s_T \gg s_s$ ,以热噪声 $s_T$ 为主, $K_B$ 为波尔兹曼常数, $T$ 为温度, $R_L$ 为负载电阻, $F_n$ 为噪声系数, $\Delta f$ 为噪声等效带宽,热噪声与电流大小无关, $s_1 = s_0 = s$ 。对于热噪声极限下的PIN光接收机,最小平均接收光功率

$$\overline{P_{\min}} = \frac{Qs_T}{R} = \frac{Q}{R} \left[ \left( \frac{4K_B T}{R_L} \right) F_n \Delta f \right]^2 \quad (7)$$

式中  $R$  为探测器响应度,  $\Delta f$  为接收机响应带宽, 对于非归零码, 其为码率的一半, 即  $\Delta f = B/2$ 。所以, 根据误码率的要求可以确定  $Q$  参数, 由传输码率的要求确定  $\Delta f$ ,  $\overline{P_{\min}}$  中其他是变化不大的常数, 这样就确定了最小接收光功率<sup>[1]</sup>。

### 1.3 系统的光功率分配

发射功率  $P_T$  经过各种损耗到达探测器的功率  $P_S$  需要大于  $\overline{P_{\min}}$ 。

$$P_S = P_T T_{ir} L T_{re} r \quad (8)$$

式中  $T_{ir}$  和  $T_{re}$  分别为发射光路和接收光路的光学损耗, 与具体系统的要求无关,  $r$  为系统冗余度。把各个量用对数坐标表示, 则有:

$$P_S = P_T - T_{ir} - L_s - T_{re} - r \quad (9)$$

式中 负号表示损耗, 由  $P_S > \overline{P_{\min}}$  就能确定系统必须的光源光功率  $P_T$ 。

## 2 TDRSS激光空间链路光功率计算分析

TDRS星所在的静止卫星轨道高度为35 860 km, 地球半径为6 376 km, 在此轨道上等距分布的多颗卫星的间距由简单的几何关系可以求得, 假设运用三颗、六颗和九颗卫星, 得到计算结果如表1所示。

表1 TDRSS星间距离

| 卫星颗数    | 三颗卫星   | 六颗卫星   | 九颗卫星   |
|---------|--------|--------|--------|
| 空间距离/km | 73 160 | 42 239 | 28 893 |

运用波长850 nm的激光光源, 透镜的直径为25 cm, 由式(3)得极限发散角为4.2  $\mu\text{rad}$ 。由表1的数据计算得到损耗随发散角的变化关系如图2所示。

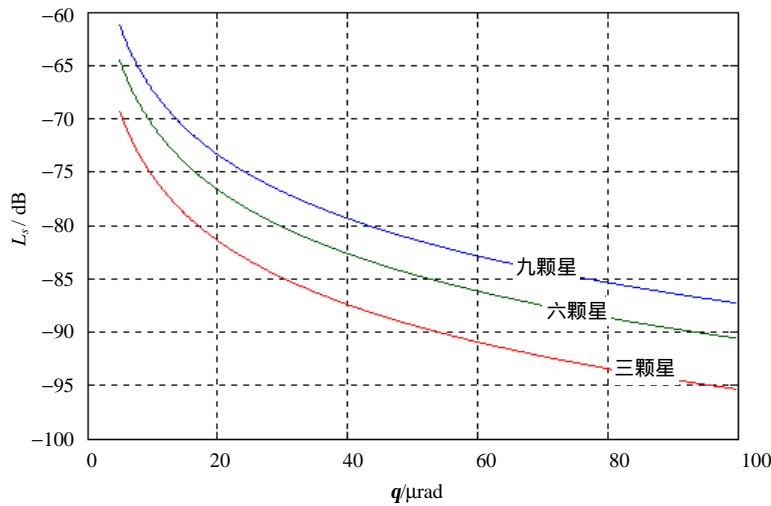


图2 传输损耗与发散角的关系

从图2得出, 若运用六颗卫星的系统, 当发散角压缩到20  $\mu\text{rad}$ 时, 传输损耗达到-77 dB, 系统无法加中继, 这对光端机的要求是很苛刻的。

假设误码率要求为  $BER=10^{-9}$ , 用非归零码传输, 噪声系数  $F_n=3$  dB, 温度为  $T=300$  K。对于目前常见的光传输速率, 分别在不同的负载电阻匹配下, 求得接收机灵敏度的要求如表2所示。

表2 不同速率下的接收灵敏度

| 速率        | 155 Mb/s     | 622 Mb/s       | 1 Gb/s       | 2.5 Gb/s     | 10 Gb/s      | 40 Gb/s      |
|-----------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 负载电阻      | 5 k $\Omega$ | 3.5 k $\Omega$ | 2 k $\Omega$ | 1 k $\Omega$ | 500 $\Omega$ | 100 $\Omega$ |
| 接收灵敏度/dBm | -38.21       | -34.42         | -32.17       | -28.67       | -24.16       | -17.65       |

系统中发射机光路和接收机光路的损耗为-3 dB, 系统富余度为-3 dB<sup>[2]</sup>, 则整个激光链路各部分功率损耗均确定, 在指定1 Gb/s的速率下, 得出发散角和传输距离对发射光功率的限制关系如图3所示。

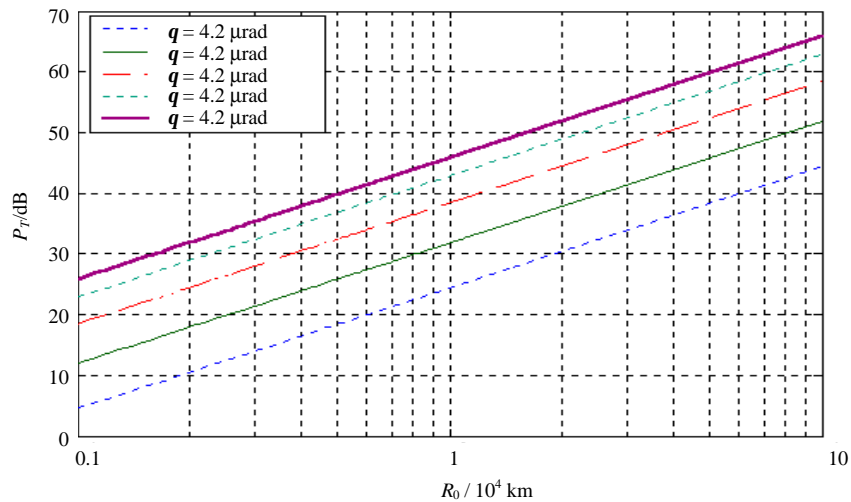


图3 1 Gb/s速率下发散角和传输距离对发射光功率的限制

图中,  $q = 4.2 \mu\text{rad}$ 是用850 nm波长25 cm透镜时的衍射极限角, 是理论上的最低值。对于 $10^4$  km以上的传输距离, 通常要求发射光功率达到瓦量级, 发散角在 $10 \mu\text{rad}$ 量级, 对激光器的要求高。在只传输几千千米时, 则只要求毫瓦级光功率, 激光器的选择空间大。另外, 在远场光斑中光功率的分布上, 本文是以平均分布来计算的, 光功率在光斑中是高斯分布<sup>[2]</sup>。在保证ATP(获取、跟踪、指向)精度时, 探测器应位于光斑的峰值功率处, 所以探测器接收的光功率会更大, 对系统的要求有所降低。

### 3 结束语

分析计算了空间激光链路上的光功率, 由于传输距离和发散角的影响, 对发射机输出光功率要求很高, 它限制着数据传输速率的提高。对于极远距离的系统, 可以选用功率高性能好的半导体泵浦固体激光器(DPSSL), 也可采用光放大器对光信号先放大到所需的功率再发射<sup>[3]</sup>, 或在接收端对微弱光信号先进行放大再输入光探测器等方案。

### 参 考 文 献

- [1] 邱 昆. 光纤通信导论[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995
- [2] 盛 立, 汤伟中, 周 文. 应用于星间光通信系统的光发送机的设计[J]. 光通信研究, 2000, (4): 22-26
- [3] 葛 林, 邱 昆, 阳树宗. 采用EDFA的空间光通信系统模型[J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(3): 261-264

编 辑 漆 蓉