

深空激光通信终端主要参数的分析与研究

陈功轩¹, 张伟^{1,2}, 叶晖¹, 刘阳¹, 王海鹏²

(1 上海卫星工程研究所 上海 201100;

2 深空探测实验室 合肥 230000)

摘要: 针对深空激光通信的应用环境和特性, 分析了通信链路中的关键性能指标, 考虑了距离光斑扩散衰减、指向控制精度衰减、大气衰减、太阳辐射、探测器暗电流噪声等因素后, 确定了通信速率和通信误码率的具体计算方法。对通信链路进行建模, 分析了各个参数的计算方法; 通过公式推导分析了发射端望远镜口径(激光束散角)与指向控制精度对最大通信距离的影响, 以数值仿真进行佐证并进一步分析了发射端望远镜口径(激光束散角)与指向控制精度的约束关系, 提出了深空激光通信参数设计的方法。在此基础上进一步计算了现有激光通信能力在地月空间、地火空间场景下的激光链路性能。

关键词: 深空激光通信; 激光束散角; 指向控制精度; 链路性能

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2024)04-0066-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231102001

引用格式: 陈功轩, 张伟, 叶晖, 等. 深空激光通信终端主要参数的分析与研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(4): 66-74.

Research on Main Parameters of Deep Space Laser Communication Terminal

CHEN Gongxuan¹, ZHANG Wei^{1,2}, YE Hui¹, LIU Yang¹, WANG Haipeng²

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201100, China;

2. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230000, China)

Abstract: According to the application environment of deep space laser communication, this paper analyzes the key performance indicators in the communication link. After taking into account factors such as distance spot diffusion attenuation, pointing control accuracy attenuation, atmospheric attenuation, solar radiation, detector dark current noise etc., this paper determines the specific calculation method of communication rate and communication bit error rate. Through formula derivation, the impact of the transmitter telescope diameter (laser beam divergence angle) and pointing control accuracy on the maximum communication distance is analyzed, and numerical simulation is used to support and further analyze the constraint relationships between transmitter telescope diameter (laser beam divergence angle) and pointing control accuracy and proposed design methods for the design of deep space laser communication links. The performance of laser links in the scenarios of earth-moon space and earth-Mars space under the existing laser communication capabilities is further calculated.

Keywords: Deep space laser communication; Divergence angle; Pointing control accuracy; Link performance

Citation: CHEN Gongxuan, ZHANG Wei, YE Hui, et al. Research on Main Parameters of Deep Space Laser Communication Terminal[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(4): 66-74.

0 引言

深空探测指的是月球或月球以远宇宙空间相关的探测, 是人类探索宇宙奥秘和寻求永续发展的重要途径, 是对拓展人类生存空间、丰富人类认知有着重要意义的重大领域^[1-4]。目前, 深空探测任务逐渐呈现多样化、复杂化的趋势, 海量数

据回传是当前面临的一大难题, 传统微波通信能力在扩展到 Ka 频段后已有不足, 亟需开发新的通信体制^[5,6]。

激光通信采用高频率激光作为载体, 与微波通信相比, 具有如下独特优势: 通信速率高; 无卫星电磁频谱限制, 抗干扰能力强; 保密性好; 体积小、重量轻、功耗低^[7]。这些优势令其成为解

决深空通信带宽瓶颈和减缓频谱资源紧张,实现高速通信的有效手段,能够满足未来深空探测日益增长的通信需求。

目前,国外开展过深空激光通信相关研究和试验的有美国、欧盟、俄罗斯、日本等^[8]。

2013年,美国完成了月球激光通信演示验证(Lunar Laser Communications Demonstration,

LLCD)。LLCD系统由月球激光通信星载终端、月球激光通信地面终端、月球激光通信终端、光学通信望远镜实验室、月球激光通信光学地面系统和月球激光通信操作中心构成,如图1所示。最终成功实现了地月空间尺度上的上行20 Mbit/s,下行622 Mbit/s激光通信^[9]。

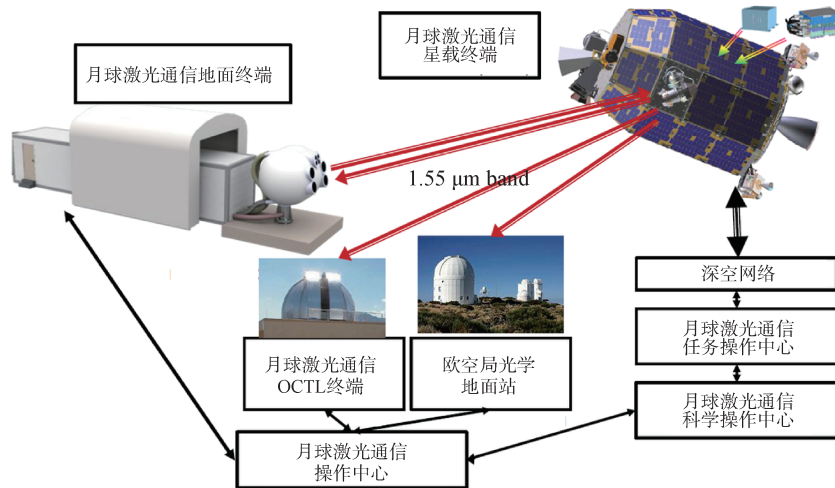


图1 LLCD结构示意图

Fig. 1 LLCD structure diagram

2020年,欧盟计划执行小行星撞击(Asteroid Impact Mission, AIM)计划,搭载激光通信终端OPTEL-D,进行7500万公里超远距离激光通信^[10]。

2023年10月,美国发射了绕火星飞行的探测器Psyche执行其深空光通信(Deep Space Optical Communication, DSOC)计划,其上搭载了深空激光通信终端,进行火星对地球的深空激光通信,距离可达5500万公里^[11]。

2018年,我国“嫦娥4号”着陆器成功完成了计划的月面探测相关任务。为了保证月球资源采集等后续月球科研任务能顺利进行,我国计划建立月球科学研究所,它将是后续各种深空信息的中继中心。为了满足其通信需求,必须研究月地高速激光信息传输技术,为我国深空探测技术的发展提供支撑。

深空激光通信相比一般的近地激光通信而言有其独特之处,因而对星上激光终端的各项参数提出了更高的要求。由于深空激光通信的传输距离较远,激光在相同的束散角下到达接收端处会形成更大的光斑,能量损耗较大,在工作波长确

定的情况下,激光束散角和发射端光学天线的口径相关,光学天线口径越大,束散角越小。同时,为了保证激光通信链路能够建立并保持应有状态,需要建立一套捕获、瞄准和跟踪(Acquisition, Pointing and Tracking, APT)系统来提供保障^[12],较远距离也对APT系统的指向控制精度提出了更高的要求。所以,要设计深空激光通信系统,必须先根据深空激光通信的特点,构建通信链路的模型,厘清各个关键参数的关系,才能得到具有高性能、高可靠的结果。

本文旨在研究在保证通信链路性能的基础上,探索深空激光通信发射望远镜口径、指向控制精度等几个星上激光终端重要参数的约束关系和它们对最大可用距离的影响,并给出一定应用场景下激光通信链路的能力,以及现有极限能力深空激光通信的应用距离极限,给深空激光通信星上终端的指标确定提供可用的方法。

1 深空激光通信信道

1.1 典型应用场景

深空激光通信系统在现有的以及未来的深空

探测活动中有广阔的应用场景。目前, 已经试验可行的有月地距离下的激光通信^[13]; 正在试验过程中的有火地距离下的激光通信; 未来, 希望深空激光通信能应用于木星等更遥远的天体探测, 如图 2 所示。

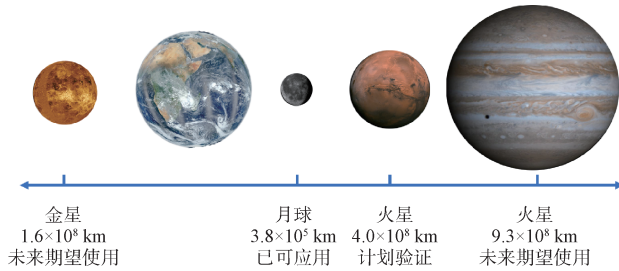


图 2 深空激光通信应用场景

Fig. 2 Deep space laser communication application scenarios

深空激光通信系统的典型应用场景如图 3 所示。卫星在环绕目标天体的轨道上飞行, 搭载了其上的载荷进行工作, 获取各种需要返还至地面的科学数据以进行进一步分析研究。这些科学数据转化为光信号后从卫星上的激光终端向位于地面的接收端发射。本文主要分析了如此场景所示的激光通信下行过程, 在保证通信链路性能指标符合要求的情况下, 探索主要参数对链路能力, 特别是最大可用距离的影响, 并进行仿真验证。

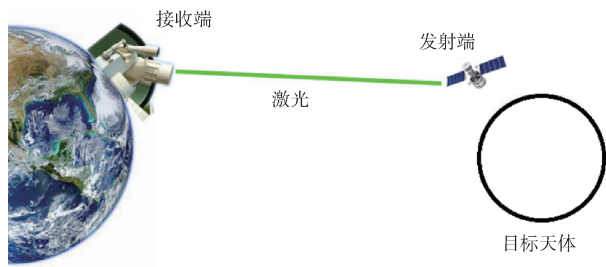


图 3 深空激光通信典型应用场景

Fig. 3 Typical deep space laser communication application scenarios

1.2 深空激光通信链路模型

深空激光通信的链路如式(1)所示:

$$P_r = P_t G_t \eta_t \eta_p (L_s \eta_a) G_r \eta_r \quad (1)$$

其中, P_r 为接收端光功率, P_t 为激光发射端光功率; G_t 和 G_r 分别为发射端和接收端的增益; η_t 和 η_r 分别为发射端和接收端的光透过率; η_p 为发射端指向误差损耗系数; L_s 为光信号在传播过程中的损耗系数; η_a 为大气损耗系数。

发射端和接收端的增益由下式给出^[14]:

$$\begin{cases} G_t = \left(\frac{\pi D_t}{\lambda} \right)^2 \\ G_r = \left(\frac{\pi D_r}{\lambda} \right)^2 (1 - \gamma_r) \end{cases} \quad (2)$$

其中, λ 为激光器工作波长, D_t 和 D_r 分别为发射端和接收端的望远镜口径, γ_r 为接收端遮蔽率。

发射端和接收端的光透过率一般与其光学器件有关, 是光信号在其中反射、折射的损耗。发射端光透过率的典型值为 0.4~0.7; 接收端光透过率的典型值为 0.5~1^[15]。

传播损耗系数与激光器工作波长 λ 、传输距离 L 有关, 由下式给出^[16]

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 \quad (3)$$

指向误差损耗系数与指向精度 δ 和激光束散角 θ_0 有关。指向偏离角 θ_p 的概率密度满足 Rayleigh 分布^[17]

$$f(\theta_p) = \frac{16\theta_p}{\delta^2} \exp\left(-\frac{8\theta_p^2}{\delta^2}\right) \quad (4)$$

图 4 为控制精度 $\delta = 8 \mu\text{rad}$ 时的指向偏差角的概率密度。

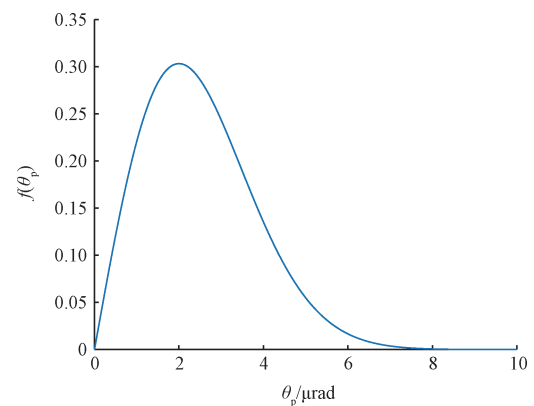


图 4 指向偏差角的概率密度

Fig. 4 Probability density of pointing angle

当指向偏离角 $\theta_p \leq \theta_0/2$ 时, 接收端望远镜才在激光光斑内部, 才能接收到信号, 反之则接收不到任何信号。所以指向误差损耗系数应为指向误差角 $\theta_p \in [0, \theta_0/2]$ 的概率, 如式(5)所示:

$$\eta_p = P\left(0 \leq \theta_p \leq \frac{\theta_0}{2}\right) = \int_0^{\theta_0/2} f(\theta_p) d\theta_p = 1 - \exp\left(-\frac{32\lambda^2}{\pi^2 D_t^2 \delta^2}\right) \quad (5)$$

大气损耗系数为下行信道中激光经过大气时

经大气吸收、大气散射、大气湍流等损失能量带来的损耗系数。精确计算需要建立大气环境模型，且激光通信在不同大气条件下受其影响差别很大，但大气环境对激光通信的影响不是本文讨论的重点，故本文在考虑大气对激光通信的影响时，只考虑大气在对激光通信较为有利条件下给激光带来的衰减。将大气吸收、大气散射、大气湍流等损耗系数结合在一起，在本文研究中取一个典型值。

为了探索主要参数对深空激光通信链路能力的影响，必须设置合适的约束。本文中约束为设计的深空激光链路必须满足关键的指标。衡量深空激光通信性能的关键指标有两个：通信速率和误码率。通信速率表征了激光通信系统在固定时间内传输信息的容量，而误码率表征了激光通信系统传输信息的准确度。只有这两个指标都符合要求时才可能实现设计一个稳定、有效且有实际工程意义的深空激光通信系统。

深空激光通信的最大速率为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r}{N} \right) \quad (6)$$

其中， B 为激光通信信道带宽，与激光终端的激光器设计有关； P_r 为接收端光功率，计算方式已由上文给出， N 为背景噪声。

在本文研究的情境中，背景噪声主要考虑太阳辐射和探测器暗噪声。在白天时，太阳辐射带来的噪声比探测器暗噪声大很多，探测器暗噪声可以忽略不计；在夜里时，探测器暗噪声则是主要的噪声来源。太阳辐射带来的噪声 N 由式(7)计算^[18]：

$$N = S \eta_a \eta_s \eta_r \frac{\pi D_t^2}{4} \quad (7)$$

其中， S 为太阳辐照强度， η_s 为接收端对特定波长的滤光系数。

暗噪声 N_d 的值由式(8)计算：

$$N_d = \frac{\sqrt{2qI_d}}{R} \quad (8)$$

式中， q 为单个电子的电荷， I_d 为暗电流大小， R 为响应度。

误码率是表征激光通信系统可靠性的指标，不管采用何种调制方式，误码率都是接收信噪比 $\text{SNR} = P_r/N$ 的函数^[19,20]。本文以BPSK调制为例，通信误码率 P 与信噪比的关系如式(9)所示

$$P = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (9)$$

其中 erfc 为互补误差函数：

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-u^2} du \quad (10)$$

2 主要参数及其关系研究

2.1 主要参数

由上一节的分析可知影响通信速率和误码率这两个关键指标的参数众多，可以分为以下几类：

① 发射端参数：信道带宽、发射端光功率、发射端增益、发射端光透过率、指向误差损耗系数；

② 接收端参数：接收端增益、接收端光透过率；

③ 传播过程参数：传播损耗系数、大气损耗系数；

④ 背景参数：背景噪声。

其中和本文关注的发射端望远镜口径、指向控制精度相关的为发射端增益、传播损耗系数和指向误差损耗系数。

观察式(2)可得，当工作波长确定时，发射端增益是发射端望远镜口径的单调函数，当发射端望远镜口径增大时，发射端增益大幅提升；观察式(3)可得，当工作波长确定时，传播损耗系数为传输距离的单调函数，当传输距离增加时，传播损耗变大，传播损耗系数变小。而式(5)可得，当工作波长确定时，若增大发射端望远镜口径，则指向误差损耗系数变小，而指向精度提高时，指向误差损耗系数变大。

若将目标通信速率设定为 C_0 ，目标误码率设定为 P_0 。结合式(1)~(9)整理可得

$$L \leq \sqrt{\frac{P_t \eta_t \eta_a G_r \eta_r}{N} \cdot (\max\{2^{C_0/B} - 1, [\text{erfc}(2P_0)]\})^{-1/2}} \cdot \frac{D_t}{4} \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{32\lambda^2}{\pi^2 D_t^2 \delta^2}\right)} \quad (11)$$

式(11)右侧第一个因子为本文关注的发射端望远镜口径，以及指向控制精度不影响的参数构成的函数，在后续仿真时将给定值；第二个因子为与指标相关的量，由于两个指标都为接收端功率的函数，可以发现最后决定最大传输距离值的只有其中一个指标，这部分在后续仿真中也将给定值；第三个因子与发射端望远镜口径以及指向控

制精度相关。

设不等式右侧第三个因子为

$$f(D_t, \delta) = \frac{D_t}{4} \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{32\lambda^2}{\pi^2 D_t^2 \delta^2}\right)} \quad (12)$$

不难发现其为 δ 的单调减函数, 即控制精度提高时, 最大传输距离增大, 但

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} f = \frac{D_t}{4} \quad (13)$$

这是因为当控制精度优于半束散角后, 接收端望远镜一定在光斑内部, 进一步提高控制精度将并不会增大最大传输距离。

为分析发射端望远镜口径对 f 的影响, 令 f 对 D_t 求偏导数得

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial D_t} = \frac{e^{-K/D_t^2} (D_t^2 e^{K/D_t^2} - D_t^2 - K)}{4D_t^2 \sqrt{1 - e^{-K/D_t^2}}} \\ K = \frac{32\lambda^2}{\pi^2 \delta^2} \end{cases} \quad (14)$$

可以看出, 偏导数大于 0, 则 f 为 D_t 的单调增函数, 进一步观察可以发现

$$\begin{aligned} \lim_{D_t \rightarrow \infty} \frac{D_t}{4} \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{K}{D_t^2}\right)} &= \\ \lim_{D_t \rightarrow \infty} \frac{1}{4} \sqrt{D_t^2 - D_t^2 \exp\left(-\frac{K}{D_t^2}\right)} &= \frac{1}{4} \sqrt{K} \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可以看出, 当发射端望远镜口径增大后, 由光斑缩小带来的能量损失减小, 和由指向控制误差带来的能量损失增大最终会到达平衡, 使得无法单纯从增大发射端望远镜口径出发来增大最大传输距离。

2.2 主要参数之间的关系

为了研究关键参数发射望远镜口径、指向控制精度和传输距离之间的关系, 需要给出其余参数的值。本文给出的参数如表 1 所示。

其余的动态参数发射端天线增益、传播损耗系数和指向误差损耗系数的值由式(2)、式(3)以及式(5)算得。将已经确定的参数带入式(5)可得

$$\eta_p = 1 - \exp\left(-\frac{3.671 \times 10^{-12}}{\delta^2 D_t^2}\right) \quad (16)$$

由图 5 可得, 当发射望远镜口径不变, 即束散角保持不变时, 提高控制精度可以减小由指向误差带来的能量损失, 但当控制精度优于半束散角时, 接收端望远镜一定在光斑内, 则再提高控制

表 1 链路参数

Table 1 Parameters for link analysis

参数	数值
信道带宽 B/bps	5.3×10^9
发射端光功率 P_t/mw	5 000
发射端光透过率 η_t	0.7
接收端望远镜口径 D_r/m	1
接收遮蔽率 γ_r	0.35
接收端增益 G_r	7.65×10^{12}
接收端光透过率 η_r	0.8
辐照强度 S/wm^{-2}	300
大气衰减系数 η_a	0.7
滤光系数 η_λ	4×10^{-11}
背景噪声 N/w	5.278×10^{-9}

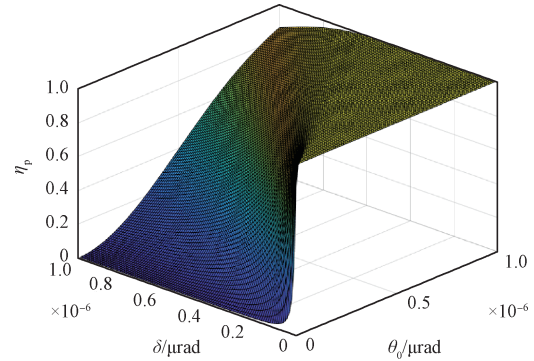


图 5 指向误差损耗系数随控制精度和束散角的变化
Fig. 5 Variation of pointing-error loss factor with control accuracy and divergence angle

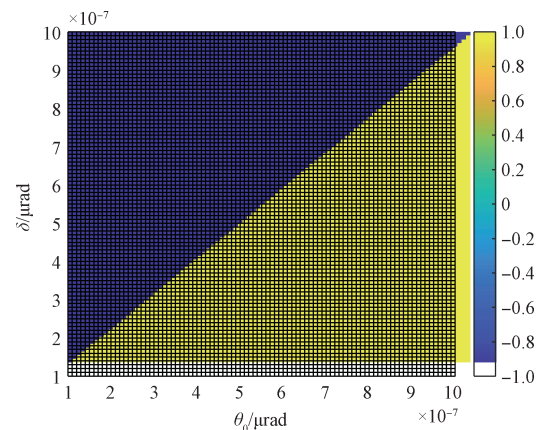


图 6 指向误差损耗系数与 0.87 比较

Fig. 6 Dividing line of pointing-error loss factor with 0.87

精度也不能进一步减少能量损失。同时, 由图 6 (图中 1 表征指向误差损耗系数大于 0.87, -1 表征指向误差损耗系数小于 0.87) 可知, 当控制精度与

束散角相近时,可令指向误差带来的能量损失控制在13%左右。

2.2.1 发射端望远镜直径对最大传输距离的影响

结合目前的深空探测通信需要,本文将通信速率的要求设定为不小于100 Mbps,误码率设定为不大于 10^{-6} 。将控制精度固定在 $1\ \mu\text{rad}$,并将所有已确定参数带入式(11),可得发射端望远镜口径和传输距离的关系如式(17)所示:

$$L \leq 3.964 \times 10^9 D_t \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{3.670}{D_t^2}\right)} \quad (17)$$

由式(17)画图可得

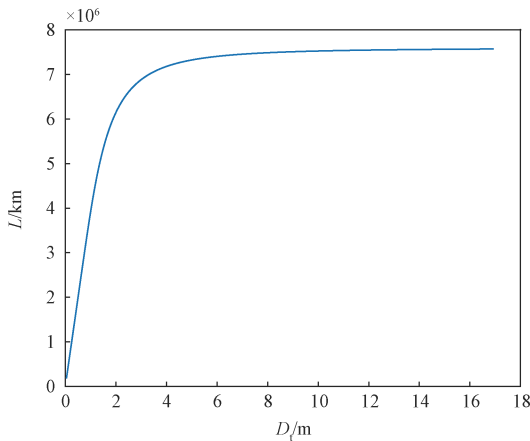


图7 传输距离随发射端望远镜口径变化

Fig. 7 Variation of distance with telescope aperture

由图7可得,最大传输距离随发射端望远镜口径增大而增大。当发射端望远镜口径增大时,发射的激光束散角减小,令等传输距离下的光斑面积减小,从而减小了由光束扩散带来的能量损失;但是与此同时,由于控制精度是确定的,当束散角过小时,接收端望远镜很容易在光斑外,大大增加了由指向误差带来的损失。当这两种效应叠加时,总体还是呈现出最大传输距离随发射端望远镜口径增大而增大的趋势。同时也可以看出当控制精度确定时,通过增大发射端望远镜口径来提高可用传输距离是存在极限的,在上文给定参数的情况下为 $7.595 \times 10^6\ \text{km}$,该结果与式(15)的推导相吻合。

2.2.2 指向控制精度对最大传输距离的影响

将发射望远镜口径固定在 $0.136\ \text{m}$ (此时束散角 $\theta_0 = 10\ \mu\text{rad}$),并将确定参数带入式(11),可得控制精度和传输距离的关系如式(18)所示:

$$L \leq 1.687 \times 10^9 \sqrt{1 - \exp\left(\frac{-2 \times 10^{-10}}{\delta^2}\right)} \quad (18)$$

由式(18)画图可得图8。

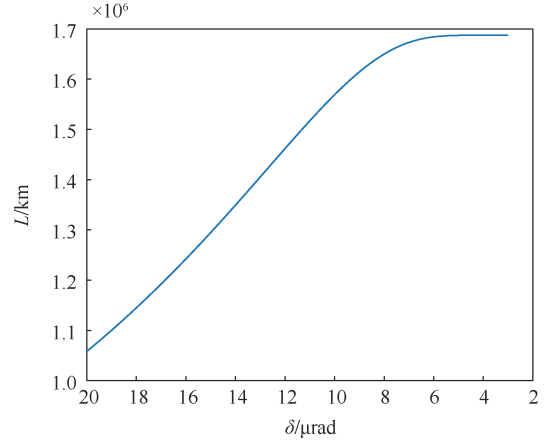


图8 传输距离随指向控制精度变化

Fig. 8 Variation of distance with control accuracy

由图6可得,最大传输距离随控制精度提高而增大,但当控制精度提高到束散角的一半后,由于望远镜一定处于光斑内,最大传输距离不再增大,在给定参数下最大传输距离可达 $1.687 \times 10^6\ \text{km}$ 。

2.2.3 指向控制精度和发射端口径的约束关系

将确定参数代入式(11),可得控制精度和束散角的关系如下

$$\delta \leq \frac{1.9 \times 10^{-6}}{D_t} \left[-\ln\left(1 - \frac{6.4 \times 10^{-20} L^2}{D_t^2}\right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (19)$$

观察式(19),右侧第一个因子为一个关于 D_t 的正值单调减函数;第二个因子也为一个关于 D_t 的正值单调减函数,则 δ 为关于 D_t 的正值单调减函数。也就是说,针对某一特定应用情境,即当可用传输距离为一定值时,若采取较大的发射端望远镜口径(较小的束散角),则可以在控制精度方面放低要求;反之,若采取较小的发射端望远镜口径(较大的束散角),则必须要有较高的控制精度。

同时从式(19)还能看出

$$D_t \geq 2.522 \times 10^{-10} L \quad (20)$$

必须成立,否则发射端望远镜的口径过小会导致激光束散角过大,光束扩散损失过大,无法进一步通过提高控制精度来满足设计要求,在式(19)反映为对数函数的自变量小于0。

通过式(19)可以进一步画出图9。如图9所示,

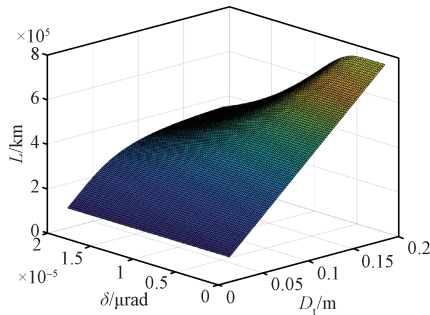


图 9 发射端望远镜口径和指向控制精度对传输距离的影响

Fig. 9 Variation of distance with control accuracy and transmitter telescope aperture

增大发射端望远镜口径(更小的束散角), 提高控制精度都能增大最大传输距离, 但两者会相互制约, 需要同时提高才能获得较好的效果。

2.3 深空激光通信星载终端参数设计方法

在深空激光通信系统中, 地面接收设备的优化可以参考近地激光通信系统。而星载激光通信终端对链路性能较大的两个因素即为指向控制精度和望远镜口径(主要影响光束束散角)。根据上文分析的参数影响, 在设计深空激光通信终端时, 首先, 要根据深空激光终端的使用需求, 确定通信速率和误码率的指标; 其次, 根据深空探测器的轨道参数以及和地球的距离, 确定最远通信距离; 最后, 结合星上的载荷负载能力, 综合考虑发射望远镜口径和指向控制精度指标的设计。可以先确定发射端望远镜口径的值, 计算指向控制精度和最大可用距离之间的关系, 并检查在指向控制精度提高至无法再让最大可用距离有可观增大之前, 是否能够满足应用的最远通信距离。如果可以, 则在保留一定裕度的情况下确定指向控制精度的指标, 否则进一步提高发射端口径的值再进行指向控制精度的指标设计直至满足最远通信距离的要求。

3 应用实例

本节将利用前一部分设计的方法仿真计算地月空间、地火空间场景下现有的深空激光通信技术和最优外部条件下的通信链路最优性能。仿真参数如表 2 所示。

3.1 地月空间

地月空间的通信距离为 $L_{\text{moon}} = 405,493 \text{ km}$ (月球远地点)。将链路最优性能仿真参数带入式(1)~

表 2 实际应用场景链路性能仿真参数

Table 2 Parameters for maximum link analysis

参数	数值
信道带宽 B/bps	5.3×10^9
发射端光功率 P_t/mw	50 000
发射端光透过率 η_t	0.9
接收端望远镜口径 D_r/m	1
接收遮蔽率 γ_r	0.1
接收端增益 G_r	8.631×10^{12}
接收端光透过率 η_r	0.9
暗电流强度 I_d/nA	20
响应度 R/Aw^{-1}	0.5
背景噪声 N_d/w	1.600×10^{-13}
发射端望远镜口径 D_t/m	1
指向控制精度 $\delta/\mu\text{rad}$	10

(9)可得

$$\begin{cases} C_{\text{moon}} = 128.9 \text{ Gbps} \\ P_{\text{moon}} < 10^{-12} \end{cases} \quad (21)$$

从式(21)可以看出, 以现有深空激光通信技术在地月空间进行激光通信应用, 能同时保证大于 100 Gbps 的高码速率和极低误码率(10^{-12})。同时, 此算例仅计算了单波长的情形, 若采用多波长探测则能获得更好的结果。

3.2 地火空间

地火空间的通信距离为 $L_{\text{Mars}} = 3.9943 \times 10^8 \text{ km}$ (地火最远距离), 现有地火微波通信的速率为 4 Mbps(天问系列任务), 本文则以通信码速率 50 Mbps, 通信误码率小于 $P = 10^{-6}$ 为目标进行仿真计算。将链路最优性能仿真参数代入式(1)~(9)可得

$$\begin{cases} L_{\text{max}} = 1.735 \times 10^9 \text{ km} > L_{\text{Mars}} \\ C_{\text{Mars}} > 50 \text{ Mbps} \\ P_{\text{Mars}} < 10^{-6} \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可得, 在保证误码率满足通信需求, 并且通信速率达 50 Mbps 时, 最大可用距离大于地火最大距离, 可以在地火空间应用激光通信; 同时也表明了激光终端存在一定的设计裕量, 也就是说, 可以在采用比仿真参数中更小的发射功率, 更小的发射望远镜口径, 或更低的指向控制精度等情况下, 仍然可以令性能满足指标, 这对设计地火空间超远距离下的激光载荷的小体积化、轻量化是有益的。综上, 仿真结果证明了在地火空间激光通信的应用相当有潜力。

4 结束语

本文通过链路建模仿真,分析了发射端望远镜口径(激光束散角)、指向控制精度对激光通信最大可用距离的影响;证明了增加发射端望远镜口径(缩小激光束散角)和提高指向控制精度都有利于增大激光通信最大可用距离,但互相制约,在—项性能固定时单纯提升另一项性能对最大可用距离的影响都存在极限;当两者同时优化时能得到更好的结果。同时,仿真计算了在现有的激光通信技术条件下地月空间、地火空间深空激光通信链路的性能,其中地月空间能实现码速率大于100 Gbps和误码率低于 10^{-12} 的高质量激光通信,而在地火空间,保证码速率达50 Mbps和误码率低于 10^{-6} 的前提下能进行激光通信,并留有一定的设计裕量。本文主要聚焦的参数为星上激光终端的相关参数,后续将进一步研究地面接收端的相关参数以及大气、噪声等参数。

参考文献

- [1] 于登云,吴学英,吴伟仁.我国探月工程技术发展综述[J].深空探测学报,2016,3(4):307-314.
YU Dengyun, WU Xueying, WU Weiren. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 307-314.
- [2] 吴伟仁,于登云.深空探测发展与未来关键技术[J].深空探测学报,2014,1(1):5-17.
WU Weiren, YU Dengyun. Development of deep space and its key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [3] 张立华,吴伟仁.月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J].深空探测学报,2018,5(6):497-505,568.
ZHANG Lihua, WU Weiren. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 497-505, 568.
- [4] 徐进,张爱兵,贺一峰,等."嫦娥4号"中继星中继通信方案研究与分析[J].深空探测学报,2018,5(6):506-514.
XU Jin, ZHANG Aibin, HE Yifeng, et al. Research and analysis for relay communication system of Chang'e-4 lunar relay satellite[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 506-514.
- [5] 刘向南,王建军,李晓亮,等.面向太阳系边际探测的激光通信方案研究[J].遥测遥控,2022,43(4):62-69.
LIU Xiangnan, WANG Jianjun, LI Xiaoliang. Laser communication proposal for solar system boundary exploration[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 62-69.
- [6] 刘向南,李英飞,向程勇.激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J].深空探测学报,2018,5(2):147-153.
LIU Xiangnan, LI Yingfei, XIANG Chengyong, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147-153.
- [7] 李凉海,刘向南,李晓亮.深空激光通信进展及应用研究[J].深空探测学报,2019,6(6):523-529.
LI Lianghai, LIU Xiangnan, LI Xiaoliang. Progress and application research of deep space laser communication[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(6): 523-529.
- [8] 王淇,马晶,谭立英,等.月地高速激光通信系统链路特性分析[J].深空探测学报,2019,6(6):537-544.
WANG Qi, MA Jing, TAN Liying, et al. Analysis of link characteristics of high-speed laser communication system in lunar-ground link[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(6): 537-544.
- [9] BOROSON D M, SCOZZAFAVA J J, MURPHY D V, et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD) [C]//2009 Third IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, Pasadena, CA, USA, 2009: 23-28.
- [10] STUMPF M, ROTH C, MOSBERGER M, et al. OPTEL-D: an optical communication system for the deep space[C]// SPIE Conference on Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation, 2018.
- [11] DOMFEH E A, PING S C. Deep space optical communications (DSOC) downlink simulation with varying PPM order[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53: 583.
- [12] 梁静远,陈瑞东,姚海峰,等.无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展[J].光电工程,2022,49(8):25-47.
LIANG Jingyuan, CHEN Ruidong, YAO Haifeng, et al. Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. Opto-Electron Eng, 2022, 49(8): 210439.
- [13] 叶晖,张伟,施伟璜,等.深空探测量子通信信道的主要参数[J].遥测遥控,2013,34(1):13-18.
YE Hui, ZHANG Wei, SHI Weihuang, et al. The main parameters of the optical quantum communication channel of deep space exploration[J]. Telemetry and remote

- control, 2013, 34(1): 13-18.
- [14] 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.
ZHAN Weida, LI Hongzuo, WANG Zhijian, et al. Analysis of deep space optical communication link characteristics and power budget[J]. Journal of the Air Force Engineering University. 2011, 12(5): 55-60.
- [15] 张慧颖. 自由空间光通信链路最优束散角分析[J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 992-995.
ZHANG Huiying. Analysis of optimal beam scattering angle for free-space optical communication links[J]. Laser and Infrared, 2019, 49(8): 992-995.
- [16] HEMANI KAUSHAL. 自由空间光通信技术[M]. 刘阳, 余林佳, 邓小飞, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2021.
- [17] 李鑫. 星间激光通信中链路性能及通信性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [18] 鲁强, 曾飞, 张玉良, 等. 天空背景辐射对大气激光通信系统误码率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 65-72.
LU Qiang, ZENG Fei, ZHANG Yuliang, et al. Effect of sky background radiation on bit error rate of atmospheric laser communication system[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2016, 53(7): 65-72.
- [19] 聂岁友. 空间光通信系统方案和误码率影响因素分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [20] 程洪玮. 卫星激光通信总体技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [作者简介]
- 陈功轩 1999年生, 硕士研究生。
张 伟 1971年生, 博士, 研究员。
叶 晖 1982年生, 博士, 研究员。
刘 阳 1983年生, 博士, 高级工程师。
王海鹏 1991年生, 硕士, 工程师。
- (本文编辑: 潘三英)
(英文编辑: 赵尹默)