

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0393-03

高斯光束特性对卫星光通信的影响分析

陈云亮, 马晶, 谭立英, 王骥

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了对卫星光通信系统进行准确的性能评估,需要综合考虑振动、光束传播衰减以及探测器噪声等特性。在综合分析振动、光束传播、倍增噪声和热噪声等多种因素情况下,研究了系统误码率性能同各影响因素的制约关系,最终定义空间传播系数统一表征了多种因素的影响。利用此结论分析了高斯光束对卫星光通信性能的影响,从而为系统设计相应参数确定给出了方法。

关键词 卫星间光通信; 高斯光束; 误码率; 随机振动

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

Analysis of the Effects of Gaussian Beam on Intersatellite Optical Communication

CHEN Yun-liang, MA Jing, TAN Li-ying, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In order to evaluate the performances of the intersatellite optical communication (IOC), the beam vibration, transmitting loss and thermal noise should be analyzed. In this paper, with the uniform analysis of beam spreading, random vibration, avalanche noise and thermal noise, the formula of sensitivity is given. And the laser transmitting factor (LTF) is introduced to describe the beam spreading and vibration. Utilizing the result, the effects of Gaussian beam on IOC are analyzed, and the means of the decision of system parameters are presented.

Key words intersatellite optical communications (IOC); Gaussian beam; BER; Random vibration

1 引言

与微波通信相比,卫星间光通信具有信息量大、天线体积小、抗干扰能力强以及保密性好等优点^[1]。

为了对通信系统进行设计需要对信道特性进行详细分析。星间激光传输过程中信道为近真空光学信道,所以可认为信道为近理想光学信道即不考虑色散。星间光学信道中的噪声主要来自于由于光学天线振动引起光束随机偏离所产生的衰减和背景光噪声,以及探测器的雪崩噪声和热噪声等。星间光通信同时受到跟瞄系统性能的制约,终端跟瞄系统保持链路的能力直接影响到系统的通信性能。

目前对星间光通信研究中对信道分析并不完善。文献[2]中分析了建立了振动的数学模型,并分析了振动对卫星光通信网络性能的影响。文献[3~5]对卫星光通信中振动影响问题进行了分析。本文将考虑随机振动对探测器接收信号的影响,进而分析光束宽度的影响。

2 空间光学信道中的传播因子

设接收天线有效面积(天线面积在入射光垂直

面上的投影)为 S ,发射光束为基模高斯光束,则接收到光功率可以表达为^[6]:

$$P_{\text{REC}} = P_{\text{IN}} \frac{2}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right) S \quad (1)$$

其中 x, y 与两星连线垂直面上的光场中心偏离;

$$\omega^2 = \omega_0^2(1+z^2/Z_0^2), \quad Z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda,$$

ω_0 为束腰半径。

$$x = L\sin\theta_x \approx L\theta_x, \quad y = L\sin\theta_y \approx L\theta_y$$

则

$$P_{\text{REC}} = P_{\text{IN}} \frac{2}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{L^2(\theta_x^2 + \theta_y^2)}{\omega^2}\right) S \quad (2)$$

即基模高斯光束在空间中传播,并考虑振动产生光束偏离引起的随机衰减,则可以定义光场传播因子 α 为

$$\alpha = \frac{P_{\text{REC}}}{P_{\text{IN}}} = \alpha_x \alpha_y$$

$$\begin{cases} \alpha_x = \sqrt{\frac{2S}{\pi}} \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{L^2\theta_x^2}{\omega^2}\right) \\ \alpha_y = \sqrt{\frac{2S}{\pi}} \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{L^2\theta_y^2}{\omega^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

为简便起见,我们令 $\sigma_\theta = \omega/L$ (即为光束束宽),对上

第二十二号贴套

式进行变量代换有

$$\begin{cases} \alpha_x = \sqrt{\frac{2S}{\pi}} \frac{1}{L\sigma_\theta} \exp\left(-\frac{\theta_x^2}{\sigma_\theta^2}\right) \\ \alpha_y = \sqrt{\frac{2S}{\pi}} \frac{1}{L\sigma_\theta} \exp\left(-\frac{\theta_y^2}{\sigma_\theta^2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中 θ_x 和 θ_y 均满足零均值高斯分布

$$f(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_v^2}\right) \quad (5)$$

式中 σ_v 为随机振动的均方值。

自由空间光传输中,由于角振幅满足零均值高斯分布的随机振动光束被随机衰减。我们用传播系数表征此随机衰减,为了以后推导方便,下面给出传播系数的统计均值。

$$\langle \alpha \rangle = \langle \alpha_x \rangle = \langle \alpha_y \rangle = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \alpha f(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} \alpha f(\theta) d\theta \quad (6)$$

(6)式中积分限应为 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$,但考虑到 $\sigma_v \approx 1$, 所以为以后推导结果的简洁,将积分限近似为 $(-\infty, \infty)$ 。将(4)式和(5)式代入(6)式,可得基模时随机衰减的均值

$$\langle \alpha \rangle = \frac{2\sqrt{S}}{\sqrt{2\pi} L \sqrt{\sigma_\theta^2 + 2\sigma_v^2}} \quad (7)$$

随机衰减均值为

$$\langle \alpha_{xy} \rangle = \frac{2S}{\pi L^2 (\sigma_\theta^2 + 2\sigma_v^2)}$$

考虑到卫星光通信系统基于跟瞄系统使链路得以保持。所以需要对上式进行修正。为此,定义链路有效性函数

$$V(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta \leq c\sigma_\theta \\ 0 & \theta > c\sigma_\theta \end{cases}$$

0 表示振动超出链路允许范围产生的链路中断,1 表示链路有效。 c 为表示链路有效范围的常数。链路平均有效值为

$$\langle V \rangle = \int_{-c\sigma_\theta}^{c\sigma_\theta} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_v^2}\right) d\theta = \text{erf}\left(\frac{c\sigma_\theta}{\sqrt{2} \sigma_v}\right)$$

其中 $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$

则修正后的随机衰减均值为

$$\langle \alpha_{xy} \rangle = \frac{2S}{\pi L^2 (\sigma_\theta^2 + 2\sigma_v^2)} \text{erf}^2\left(\frac{c\sigma_\theta}{\sqrt{2} \sigma_v}\right) \quad (8)$$

3 卫星光通信灵敏度

通信系统设计中,首先需要进行分析通信系统

的灵敏度。所谓灵敏度指的是在保证一定误码率要求下系统需要接受的最低光功率。可以预计的是,长距离传播光束扩散和随机振动引起的光束随机偏离将引起一定灵敏度代价,下面的工作是定量给出了星间距离和随机振动同灵敏度之间的关系。借助光纤通信理论,可以得到判决点上噪声为

$$N_s(t) = \langle u^2(t) \rangle - \langle u(t) \rangle^2 = \int_{-\infty}^{\infty} e\rho \langle g^2 \rangle h_s(t-t') \left[\alpha \sum_{k=-\infty}^{\infty} E_k h_p(t'-KT) \right] dt' \quad (9)$$

我们的目的是求得平均噪声。鉴于这样的事实,即光束振动的频率通常 < 1 kHz, 通信频率通常 > 100 MHz, 也就是在振动的一个周期之内,信号在 0 和 1 之间变化足多多,因此可以用时间平均代替统计平均。噪声功率对振动的平均直接采用统计平均。所以为求得平均噪声功率首先将随机衰减 α 视为常量对上式进行傅里叶变换,并对整个频率轴积分,最后对积分结果求 α 的统计平均从而得到总平均功率。

$$N_s = \int_{-\infty}^{\infty} e\rho \langle \alpha \rangle \langle g^2 \rangle \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} E_k \exp(j\omega KT) \right] H_r(\phi) \times \left[\frac{H_s(\phi) * H_p(\phi)}{H_r(\phi) H_p(\phi)} \right] d\phi \quad (10)$$

$$\begin{cases} \omega = 2\pi f_s \phi \\ H_r(\phi) = H_p(2\pi f_s \phi) \\ H_s(\phi) = \frac{1}{T} (2\pi f_s \phi) \end{cases} \quad (11)$$

可证明当“0”,“1”等概率分布时,根据 Personick-CCITT 改良法^[7]的计算,有下面方程成立

$$\left(\frac{E_m \rho \langle g \rangle \langle \alpha \rangle}{Q} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_m \rho \langle g \rangle \langle \alpha \rangle}{Q} \right)^4 (N_1 + N_0) + (N_1 - N_0)^2 = 0 \quad (12)$$

噪声平均功率

$$N_1 = N_{s1} + z; \quad N_0 = N_{s0} + z$$

式中 z 为热噪声平均功率。将 N_{s1}, N_{s0} 为“0”和“1”时的倍增噪声,由 $\langle g^2 \rangle \approx \langle g \rangle^{2+2z}$, 解方程得

$$E_m = \frac{eQ^2 \langle g \rangle^x}{\langle \alpha \rangle \rho} \left[\Sigma_1 + \sqrt{(\Sigma_1 - I_1) + \frac{4z}{e^2 Q^2 \langle g \rangle^{2+2z}}} \right] \quad (13)$$

5 光束特性对灵敏度的影响分析

从上文可以知道,星间光通信中光场从发射端传播至接收端,此过程中首先经历光束扩散所引起的光场强度衰减,并且光场随机偏离也产生了随机衰减。(7)式和(8)式给出的空间传播系数定量描述了由于这种随机衰减。即

$$\langle \alpha_{xy} \rangle = \frac{2S}{\pi L^2 (\sigma_v^2 + 2\sigma_c^2)} \operatorname{erf}^2 \left(\frac{c\sigma_\theta}{\sqrt{2}\sigma_v} \right)$$

(13)式给出了忽略背景光和暗电流情况下数字光接收机的灵敏度表达式,式中引入了空间传播系数 α 。从(13)式可以看出,星间光通信中接收灵敏度与空间传播系数的统计平均存在着简单的线性关系,即

$$E_m \propto 1/\langle \alpha \rangle \quad (14)$$

图1和图2给出了在不同 σ_v 和 c 下 $\langle \alpha \rangle$ 的变化规律。参量 σ_v 代表了通信终端振动抑制的效果, c 则代表了跟瞄系统保持链路的能力。图1中可以看出链路传播系数存在最优值,最优值的值随振动均方差 σ_v 的增大而减小。同样,图2给出结果为 $\langle \alpha \rangle$ 随 c 的增大而增大, $\langle \alpha \rangle$ 同样存在最优值。基于上述结

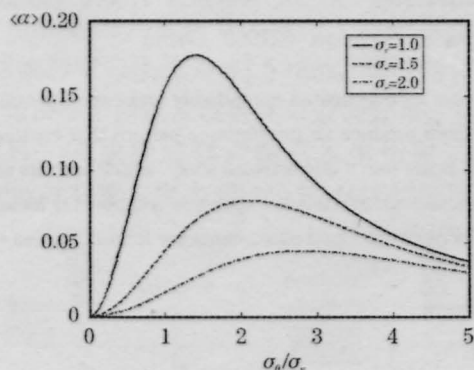


图1 不同 σ_v 下 $\langle \alpha \rangle$ 的变化

Fig.1 $\langle \alpha \rangle$ in different σ_v

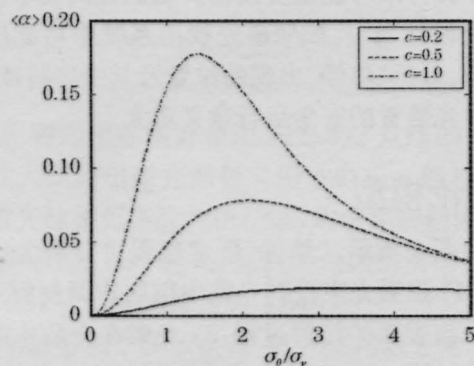


图2 不同 c 下 $\langle \alpha \rangle$ 的变化

Fig.2 $\langle \alpha \rangle$ in different c

果,可以得到的结论是适当选择光束宽度 σ_θ 可以使终端通信性能最优化,但是最优化的通信能力受到跟瞄系统性能的制约,即在卫星光通信系统中应首先使跟瞄系统对终端平台振动进行抑制(减小 σ_v)和提高链路有效性(增大 c)。

根据数值运算求最优化值的结果,可以得到选择束宽的经验公式

$$\sigma_{v, \text{opt}} \approx c^{-1} \sigma_v \quad (15)$$

在实际的系统设计中,可以根据(15)式确定通信光束的束宽。

参考文献

- 1 R. G. Marshalek, G. S. Mecherle, P. R. Jordan. System-level comparison of optical and RF technologies for space-to-space and space-to-ground communication links circa 2000 [C]. *SPIE*, 1996, 2699:134-145
- 2 S. Arnon, N. S. Kopeika. The performance limitations of Free Space Optical Communication Satellite network due to vibrations - analog case[J]. *IEEE*, 1996, 0-7803-3330:287-290
- 3 Huang Bo, Geng Wanzhen, Jin Enpei et al.. Analysis of influence of vibration to bit error rate for a system of space optical communication[J]. *J. Astronautics*, 1999, 20(3):76-82
黄波,耿完桢,金恩培等. 振动对空间光通信系统误码率影响的分析[J]. 宇航学报, 1999, 20(3):76-82
- 4 Wang Qi, Ma Jing, Tan Liying. Analysis of bit error rate in a space optical communication system under a simplified vibrating model[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(1):4-9
王骥,马晶,谭立英等. 简化振动模型下空间光通信系统误码率分析[J]. 激光技术, 2002, 26(1):4-9
- 5 Yu Siyuan, Gao Huide, Han Qiqi et al.. Study of the influence of sine vibration on bit error rate in intersatellites optical communications[J]. *High Technology Letters*, 2001, 12:44-47
于思源,高惠德,韩琦琦等. 卫星光通信中正弦振动对误码率影响研究[J]. 高技术通讯, 2001, 12:44-47
- 6 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiaye. The Theory of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press. 1995.64-69
周炳坤,高以智,陈家骅. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.64-69
- 7 Zhao Zisen et al.. Optical Fiber Communication Engineering (Revision) [M]. Beijing: The Peoples Post & Telecom Press, 1994.433-445
赵梓森等. 光纤通信工程(修订本)[M].北京:人民邮电出版社, 1994.433-445