

卫星振动对星间光码分多址系统性能的影响*

谭庆贵 胡 渝 赵悦莹

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

摘 要 卫星振动是影响星间光 CDMA 通信系统性能的一个重要因素. 考虑多用户干扰、背景光噪音、热噪音、接收机噪音和卫星振动, 给出了基于 PPM 信号格式的星间二维光 CDMA 通信系统的系统模型. 采用数值分析的方法, 详细分析了卫星振动对该系统误码率性能的影响. 结果表明, 码速率、通信波长和卫星振动都会影响星间二维光 CDMA 通信系统的误码率性能. 当卫星振动标准偏差 $\sigma \leq 4 \times 10^{-7}$ 时, 卫星振动对系统误码率性能的影响较小; 当卫星振动标准偏差 $\sigma \geq 1.2 \times 10^{-6}$, 卫星振动对系统误码率性能的影响很大, 得到的误码率难以满足系统的通信要求, 需要采用卫星振动抑制或补偿等技术提高星间二维光 CDMA 通信系统的误码率性能.

关键词 星间光通信; 光码分多址; 卫星振动; 二维光正交码

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 星间光通信技术以其容量大、体积小、功耗低等特点得到了快速发展^[1~3]. 将光 CDMA 技术应用到卫星光通信中, 不仅可以充分利用星间光通信系统的带宽、提高系统容量, 而且使星间光通信系统具有保密性、软容量、适于突发通信、易于组建星间全光网络等优点^[4~6], 具有广泛的应用前景. 在星间光 CDMA 通信系统中, 卫星平台的振动会造成接收光功率的起伏, 降低系统的通信质量. 如何有效抑制卫星平台的振动对通信性能的影响, 是星间光 CDMA 通信需要解决的一个关键技术^[7]. 本文建立了基于 PPM 信号格式的星间二维光 CDMA 通信系统的系统模型, 采用数值分析法, 详细分析了卫星振动对系统误码率性能的影响.

1 卫星振动的振动模型

卫星平台振动的频谱特性取决于卫星的空间环境物理性质和卫星进行的特定操作. 卫星刚体运动会引起低频振动, 而对卫星的运载舱和有效载荷操作会引起中频到高频的振动. 振动显示出低频高幅度和高频低幅度的特性. 根据几种典型卫星平台振动的功率谱密度, 振动偏转角 θ 的概率密度函数 pdf (Probability Density Function) $p(\theta)$ 可以表示为高斯分布^[6]

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(\theta)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

式中 $\theta(t)$ 为卫星振动偏转角, σ 是振动标准偏差, 又

称为为噪音等效角 (noise equivalent Angle, NEA).

在星间光通信系统中, 设 O' 为发射光端机, O 为距发射端机距离为 z 处的接收端面的中心 (如图 1), 如果不存在卫星振动, 系统对准后, 探测器应在

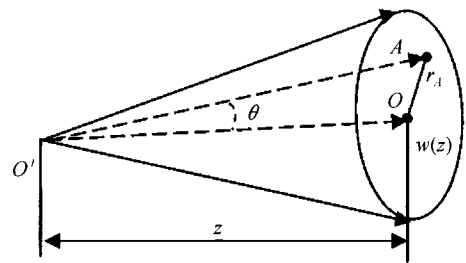


图 1 星间光 CDMA 系统中光学参量关系图

Fig. 1 Schematic relationship of optical parameters in inter-satellite optical CDMA system

接收端面的中心 O 点处, 此处的光强为 I_0 . 然而由于存在卫星振动, 使发射光束偏转角度 θ , 探测器移至距接收端面中心为 r 处的 A 点. 假定光源发出的光束为高斯光束, 那么接收到的光强 I_A 满足

$$I_A = I_0 \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \approx I_0 \exp\left[-\frac{(z\theta)^2}{w^2(z)}\right] \quad (2)$$

式中, $w(z) = w_0 \left[1 + \left[\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right]^2\right]^{1/2}$, w_0 为光腰半径, λ

为光波波长. 定义 $\Theta(t) = \exp\left[-\frac{(z\theta)^2}{w^2(z)}\right]$, 则有

$$I_A = \Theta(t) I_0 \quad (3)$$

2 星间二维光 CDMA 系统模型

星间光 CDMA 通信系统是一种功率受限系统, 更适合采用 PPM (Pulse Position Modulation) 信号格式. 目前研究的空间光 CDMA 系统主要采用一维光正交码, 系统容量小. 由于二维光 CDMA 系统具有更好的系统性能^[7,8], 本文分析星间二维多波

* 国家自然科学基金 (60272006) 资助

Tel: 028-83207030 Email: uestctqg@163.com

收稿日期: 2005-07-11

长光CDMA系统中卫星振动对误码率性能的影响.

设在线用户数为 N , 第 1 个用户是期望用户, a_i^j 为期望用户的码序列, a_i^n 为干扰用户的码序列, 那么这两个地址码之间的平均碰撞概率可以表示为

$$P_I = \frac{1}{M} E \left\{ \sum_{j=1}^F a_i^j a_i^{j \oplus U} \right\} = \frac{1}{M} \times \frac{K^2}{F^2} = \frac{K^2}{MF^2},$$

$$n \in \{2, \dots, N\} \quad (4)$$

这里符号 $E\{\}$ 表示计算均值, \oplus 表示模 F 加, U 表示一个移位变量. M 为一个时间帧中时隙的个数.

定义对第 i 个时隙的干扰向量为 κ_i , 表示为

$$\kappa_i = (l_i(1), l_i(2), \dots, l_i(N-1)) \quad (5)$$

式中 $l_i(n)$ 为用户 n 对期望用户第 i 个时隙的干扰.

定义第 i 个 PPM 时隙的相关解扩输出为 Y_i , 那么星间二维无线光 CDMA 通信系统的误字率 P_e 可以表示为^[5]

$$P_e = \sum_{i=0}^{M-1} P[e|i] P\{i\} \quad (6)$$

式中 $P\{i\}$ 是第 i 个码字出现的概率, 在先验概率相等的条件下, $P\{i\} = 1/M$. $P[e|i]$ 为在第 i 时隙上相关解扩输出后的误判概率, 可以表示

$$P[e|i] = \Pr\{Y_j \geq Y_i, j \neq i | i\} \leq \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} \Pr\{Y_j \geq Y_i | i\} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$P_e \leq \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} \Pr\{Y_j \geq Y_i | i\} P\{i\} = \frac{2}{M} \sum_{d=0}^{M-1} (M-d) \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\} \quad (8)$$

式中, $\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\}$ 可以表示为

$$\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\} = \sum_{\kappa_0} \sum_{\kappa_d} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \kappa_0, \kappa_d\} \cdot \Pr\{\kappa_0, \kappa_d | 0\} = \sum_{\kappa_0} \sum_{\kappa_d} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \kappa_0, \kappa_d\} \Pr\{\kappa_0, \kappa_d\} \leq \sum_{\kappa_d} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \kappa_0 = 0, \kappa_d\} \Pr\{\kappa_d\} \quad (9)$$

式中 $\Pr\{\kappa_d\}$ 为码片碰撞引入的概率, 表示为

$$\Pr\{\kappa_d\} = \binom{N-1}{|\kappa_d|} P_I^{|\kappa_d|} (1-P_I)^{N-1-|\kappa_d|} \quad (10)$$

式中 $|\kappa_d|$ 为向量 κ_d 中的“1”的个数.

对于 APD 探测器, 其输出可以作高斯近似^[5], 从而得到

$$\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \kappa_0 = 0, \kappa_d\} = \int_0^\infty p(\theta_0) \cdots \int_0^\infty p(\theta_{N-1}) \cdot \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d^2(\Theta)}} e^{-\frac{(x-\mu_d(\Theta))^2}{2\sigma_d^2(\Theta)}} \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2(\Theta)}} e^{-\frac{(y-\mu_0(\Theta))^2}{2\sigma_0^2(\Theta)}} dy dx d\theta_0 d\theta_1 \cdots d\theta_{N-1} \quad (11)$$

式中 $\Theta = (\Theta_0, \Theta_1, \dots, \Theta_{N-1})$, Θ_i 代表第 i 个用户的振动偏转角引起的光强闪烁, $\mu_d, \mu_0, \sigma_d^2, \sigma_0^2$ 分别为 Y_d 和 Y_0 的均值和方差. 式(12)~(15)分别为均值和方差的计算式

$$\mu_d(\Theta) = GT_c \left[\sum_{i=1}^{N-1} l_d(i) \Theta_i \lambda_{s,i} + K \Theta_0 \lambda_{s,0} / M_e + \sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) \Theta_i \lambda_{s,i} / M_e + K \lambda_b + I_b / e \right] + T_c I_s / e \quad (12)$$

$$\mu_0(\Theta) = GT_c \left[K \Theta_0 \lambda_{s,0} + \sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) \Theta_i \lambda_{s,i} / M_e + K \lambda_b + I_b / e \right] + T_c I_s / e \quad (13)$$

$$\sigma_d^2(\Theta) = G^2 F_e T_c \left[\sum_{i=1}^{N-1} l_d(i) \Theta_i \lambda_{s,i} + K \Theta_0 \lambda_{s,0} / M_e + \sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) \Theta_i \lambda_{s,i} / M_e + K \lambda_d + I_b / e \right] + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2 \quad (14)$$

$$\sigma_0^2(\Theta) = G^2 F_e T_c \left[K \Theta_0 \lambda_{s,0} + \sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) \cdot \Theta_i \lambda_{s,i} / M_e + K \lambda_b + I_b / e \right] + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2 \quad (15)$$

在式(12)~(15)中, T_c 为码片周期, M_e 为消光因子, λ_b 是背景光吸收率, G 是 APD 的平均增益, I_s 是 APD 的面漏电流, I_b 是 APD 的体漏电流, F_e 为附加噪声因子. $\lambda_{s,i}$ 是第 i 个用户的光子吸收率^[5].

对于采用 PPM 信号格式的通信系统, 根据误码率 P_b 和误字率 P_e 满足关系^[5], 就可以分析星间光 CDMA 通信系统的误码率性能.

3 仿真结果及分析

根据前面得到的系统模型, 采用数值分析的方法, 分析卫星振动对星间二维光 CDMA 通信系统误码率性能的影响. 为了便于分析, 在此通信系统中采用码长为 57、码重为 8 的二维光正交码. 设光源的中心波长 $\lambda = 1550$ nm, 通信距离为 5×10^6 m, 光腰半径为 12.5 cm, 背景光功率为 -55 dBm, M 的值设为 4, 其它与接收机有关的参量由文献[5]给出.

假定码速率 $R_b = 622$ Mbps, 卫星振动的标准偏差取不同值时, 图 2 给出了系统误码率和接收光功率之间的关系曲线. 从图中可以看出, 振动的标准偏差较小时 ($\sigma \leq 4 \times 10^{-7}$), 振动不是影响系统误码

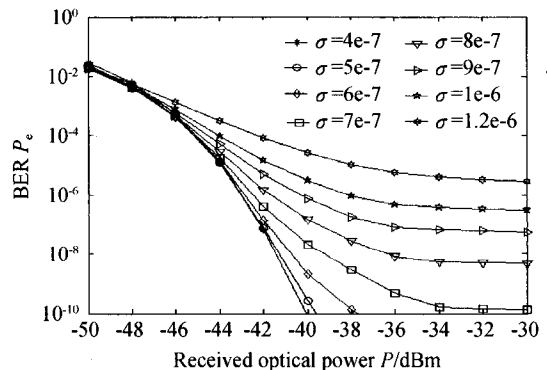


图 2 振动的标准偏差为不同值时误码率随接收光功率之间的关系曲线

Fig. 2 BER versus the received optical power with different standard variances of vibration

率性能的主要因素,但当振动的标准偏差 $\sigma \geq 1.2 \times 10^{-6}$ 时,只增大有效的接收光功率,系统难以实现通信,可以采用振动抑制、前向纠错或多用户检测技术等方法来降低卫星振动对系统性能的影响^[7,10,11].

假定 $\sigma = 6 \times 10^{-7}$,其它参量不变,码速率取不同值时,图 3 给出了误码率随接收光功率的变化关系.从图中可以看出,对于 155 Mbps 的通信系统,接收光功率为 -48 dBm 时,系统的最小误码率可达为 1×10^{-9} ,而对于码速率 1.28 Gbps 的通信系统,要想达到此最小误码率,接收光功率至少需要 -39 dBm,这说明码速率也是影响星间二维无线光 CDMA 通信系统的一个重要因素.

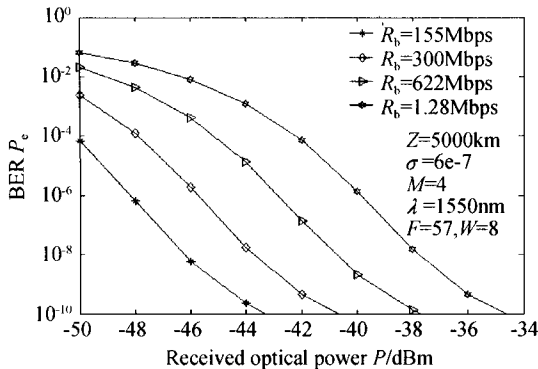


图 3 不同码速率条件下误码率和接收光功率之间的关系曲线

Fig. 3 BER versus the received optical power with different bit rates

假定 $\sigma = 6 \times 10^{-7}$,码速率为 622 Mbps,其它参量不变,图 4 给出了不同波长条件下的误码率随接收光功率的变化关系.从图中可以看出,对于采用 1550 nm 波长的星间二维无线光 CDMA 通信系统,最小接收光功率为 -42 dBm 时,可以实现通信.而对于采用 800 nm 波长的通信系统,在其它条件相同时,却难以实现通信.随着光通信技术的发展,对于采用 1550 nm 波段的通信系统,关键技术和光电子器

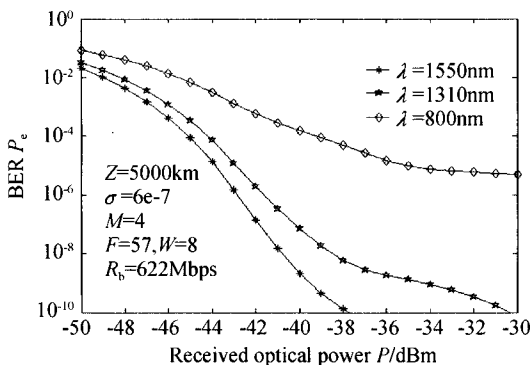


图 4 通信波长为不同值时误码率和接收光功率之间的关系曲线

Fig. 4 BER versus the received optical power with different wavelengths

件得到了快速发展,特别是光放大技术的解决使得 1550 nm 波段在星间光 CDMA 通信系统中具有更加广泛的应用前景和重要的应用价值.

4 结论

考虑多用户干扰、APD 噪音以及热噪音,详细分析了卫星振动对星间二维无线光 CDMA 通信系统误码率性能的影响.从数值分析结果可以看出,波长、码速率和卫星振动共同影响系统的性能,1550 nm 波段更适合星间二维光 CDMA 通信系统.在 $R_b = 622$ Mbps 的 1550 nm 通信系统中,当振动的标准偏差 $\sigma \geq 1.2 \times 10^{-6}$ 时,系统难以实现通信.在设计实际的星间二维光 CDMA 通信系统时,可以根据本文理论分析得到的 NEA 的取值范围和卫星平台的功率谱密度的特点,分析引起卫星振动的主要因素,选择合适的振动抑制或振动补偿技术,降低振动对系统误码率性能的影响,使其满足星间二维光 CDMA 通信系统实现通信时对误码率的要求.

参考文献

- Chan V W S. Optical satellite networks. *Lightwave Technology*, 2003, **21**(11): 2811~2827
- Guelman M, Kogan A, Kazarian A, et al. Acquisition and pointing control for intersatellite laser communications. *Aerospace and Electronic Systems*. IEEE Transactions on Electronic Systems, 2004, **40**(4): 1239~1248
- 潘湖迪, 金韬. 相干检测星间跟踪技术方案的优化设计. *光子学报*, 2005, **34**(5): 694~696
Pan H D, Jin T. Acta Photonica Sinica, 2005, **34**(5): 694~696
- Sayano K, Nguyen I, Chan J K. Demonstration of multi-channel optical CDMA for free space communications. *Proc SPIE*, 2001, **4272**: 39~49
- Ohtsuki T. Performance analysis of atmospheric optical PPM CDMA systems. *Lightwave Technology*, 2003, **21**(2): 406~411
- Shlomi Arnon, Kopeika N S. Laser satellite communication network-vibration effect and possible solutions. *Proceedings of IEEE*, 1997, **85**(10): 1646~1661
- 李传起, 孙小菡, 张明德, 等. 基于 2D-OOC 的 OCDMA 系统的地址码结构研究. *光子学报*, 2003, **32**(1): 46~50
Li C Q, Sun X H, Zhang M D, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, **32**(1): 46~50
- 李传起, 孙小菡, 张明德, 等. OCDMA 系统二维 RS 地址码的设计方案及性能分析. *光子学报*, 2004, **33**(2): 187~191
Li C Q, Sun X H, Zhang M D, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, **33**(2): 187~191

Influence of Satellite Vibration on the Performance of Inter-Satellite Optical CDMA Communication System

Tan Qinggui, Hu Yu, Zhao Yueying

Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054

Received date: 2005-07-11

Abstract Satellite vibration was one of important factors which affected the performance of inter-satellite optical CDMA communication system. Considering the effects of multi-user interference, atmospheric scintillation, avalanche photodiode detector (APD) noise, thermal noise, and satellite vibration, the system model of intersatellite two-dimensional optical CDMA communication system with PPM signal format was presented, and the influence of satellite vibration on the bit error rate of this system was analyzed in detail. The results show that the wavelength, bit rate and satellite vibration could affect the bit error rate of inter-satellite two-dimensional optical CDMA communication system all together. In the two-dimensional optical CDMA communication system which bit rate was 622 Mbps and wavelength was 1550 nm, when the standard variance was small ($\sigma \leq 4 \times 10^{-7}$), it couldn't affect the bit error rate of this communication system severely. Otherwise, when the normal variance was large ($\sigma \geq 1.2 \times 10^{-6}$), the bit error rate couldn't satisfy the requirement of communication. Some methods needed to be used to suppress the influences of satellite vibration on the bit error rate of inter-satellite two-dimensional optical CDMA communication system.

Keywords Inter-satellite optical communication; Optical code division multiple access; Satellite vibration; Two-dimensional optical orthogonal codes



Tan Qinggui was born in 1975. He received the M. S. Degree in computer optics from the Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), in 2002. He is currently working toward Ph. D. in the same institute of UESTC. His reaching interests include space optical communication technologies, optical CDMA techniques and optical signal processing.