

## 瑞利振动下空间光通信误码率研究

李勇军, 赵尚弘, 胥杰, 方绍强

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要: 在假设空间光通信链路建立起来的前提之上, 以瑞利分布描述卫星光通信平台振动, 对高斯光束在强度调制/直接检测(IM/DD)光通信系统系统的误码率进行计算, 得出了卫星平台震动而产生的指瞄误差对系统性能的影响, 为卫星光通信系统的设计提供有益的参考。

关键词: 瑞利振动; 卫星光通信; 误码率

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)05-0048-03

空间光通信系统包括卫星光通信和自由空间光通信, 由于其高速、宽带、结构紧凑和频段不受限制等优点而成为未来卫星网络和解决最后 1 km 接入网的最佳选择之一。同时由于发射光束角在微弧度量级, 要实现遥远的星间光链路, 光束快速精确的捕获追踪就变得非常困难, 即使通信平台微小的振动, 都可能使接收光强有极大衰减, 误码率会急剧上升, 严重情况下会超出接收机视场, 使通信中断, 因此研究空间光通信系统平台振动对通信系统误码率的影响具有非常重要的理论和实际意义。

## 1 光源光强分析

在远距离卫星激光通信系统中, 光源发出的激光大部分为高斯光束, 可表示成如下的通用表示式<sup>[1]</sup>:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{c}{w(z)} e^{-\frac{r^2}{w^2(z)}} e^{-i[k(z + \frac{r^2}{2R}) - \arctan \frac{z}{f}]}$$

其中, 光束半径  $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}$ ,  $f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ ,  $w_0 = \sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}}$ ,  $w_0$  是基模高斯光束的腰斑半径,  $f$  表示光斑半径增加到腰斑的  $\sqrt{2}$  倍处的位置。

从上式可以看出基模高斯光束在横截面内的场振幅分布按高斯函数  $e^{-\frac{r^2}{w^2(z)}}$  规律从中心向外平滑地衰减, 设光斑中心处的光强为  $I_0$ , 距离光斑中心为  $r_p$  的点  $p$  处的光强为  $I_p$ , 由于光强分布由场振幅的平方来决定, 这样就可以得出下面的表达式:

$$I_p = I_0 \exp\left(-\frac{2r_p^2}{w^2(z)}\right), w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} = w_0 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0}\right)^2\right)^{1/2}$$

## 2 振动模式

空间激光通信中, 要实现卫星之间或卫星与地面站之间的通信, 必须保持两个终端之间的线性可视化, 微小的震动都可能使接收光线偏离检测器中心, 引起误码率下降, 本文引用一个相互正交且服从正态分布的水平和垂直的指瞄误差模式<sup>[2]</sup>, 俯仰角指瞄误差为  $f(\theta_v) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta_v^2}{2\sigma_v^2}\right)$ , 方位角指瞄误差为  $f(\theta_h) =$

收稿日期: 2006-03-09

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 李勇军(1979-), 男, 陕西榆林人, 博士生, 主要从事卫星光通信研究;

赵尚弘(1964-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与激光技术研究。

$\frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta_h^2}{2\sigma_h^2}\right)$ , 其中  $\sigma_v$  和  $\theta_v$  分别是垂直方向指瞄误差的方差和指瞄角,  $\sigma_h$  和  $\theta_h$  分别是水平方向指瞄误差方差和指瞄角。基于两个方向的相互正交性及其对称性质, 令  $\theta = \sqrt{\theta^2 V + \theta_h^2}$ , 总的指瞄误差服从瑞利分布, 其概率密度函数为  $f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right)$ 。

### 3 误码率计算

当没有振动时, 接收机位于接收视场的光斑中心处, 当发生振动后, 入射光线偏离接收机, 相当于在接收平面上, 接收机偏离光斑中心, 如果振动幅度过大, 在发送“1”码时, 接收机接收到的光功率低于判决门限, 此时就产生漏报概率  $P(0/1)$ 。空间卫星激光通信中, 在接收机视场内, 噪声源可以认为是不变的, 由于背景光场分布范围很广, 接收机的振动对接收到的背景光强几乎没有影响。当系统发送“1”码的情况下, 分析漏报概率时我们假设接收到的信号光强远大于噪声, 因此忽略噪声的影响; 理想情况下发送“0”码时没有接收到任何信号光强, 在接收机上配置窄带光滤波器可以滤掉背景光噪声, 此时只要设置合适的判决门限, 有理由认为不会产生误判, 即漏判概率就是系统的误码率。

我们以单极性的二进制归零码作为发送码型, 经过扰码处理后, 系统发送“0”码和“1”码的概率相等, 即都等于  $1/2$ 。系统的误码率  $BER = p(0)p(1/0) + p(1)p(0/1) = 1/2[p(1/0) + p(0/1)]$ 。为了计算系统误码率, 必须计算判决电平。令  $I_0/I_p = M (M > 1)$ , 取判决电平为当  $p$  点处的光强降为中心光强的  $1/M$  时的光强, 即当卫星振动使得接收到的光强小于  $I_0/M$  时, 被判为“0”, 当接收到的光强大于  $I_0/M$  时, 判为“1”, 此时所对应的接收点到光斑中心的距离为  $R_M$ , 则有  $R_M = \sqrt{\frac{1nM}{2}} w(z)$ 。由于卫星光通信距离很长, 所以对应的振

动角  $\theta_M = \frac{R_M}{z} = \frac{w(z)}{z} \sqrt{\frac{1nM}{2}}$ , 我们用  $\theta_M$  来计算系统误码率, 并分析判决角对误码率的影响。

$$P(0/1) = \int_{\theta_M}^{+\infty} f(\theta) d\theta = \int_{\theta_M}^{+\infty} \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2}\right) d\theta$$

$$BER = p(0)p(0/1) = \frac{1}{2}P(1/0) = \frac{1}{2} \int_{\theta_M}^{+\infty} \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2}\right) d\theta = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\theta_M^2}{2\sigma_\theta^2}\right)$$

### 4 数值分析与结论

我们选取高斯光束腰斑半径  $w_0 = 20$  cm, 通信距离  $z = 10\ 000$  km, 波长  $\lambda = 850$  nm, 判决门限取  $M = 2$ , 得到系统误码率随振动幅度变化关系曲线图(见图1), 从图中可以看出, 随着振动的增加, 开始阶段误码增加缓慢, 当振动方差超过  $2.85 \times 10^{-8}$  后, 误码率开始急剧上升。

为了比较波长对系统误码率的影响, 其它参数不变, 选取  $z = 100\ 000$  km, 我们比较了目前卫星光通信系统中常用的2个波长  $\lambda = 850$  nm 和  $\lambda = 1\ 550$  nm 时的情况(见图2)。在较小振动情况下, 两个波段上误码率相差不大, 随着振动的增加二者的误码性能差别逐渐增加,  $1\ 550$  nm 波段的误码性能要优于  $850$  nm 波段, 较早的系统如 SILEX, 都采用的  $850$  nm 的波长, 由于  $1\ 550$  nm 波段刚好在参饵光纤放大器(EDFA)的放大带宽内, 因此将来的卫星光通信系统宜采用  $1\ 550$  nm 波段来降低系统误码率。

文献[5]取  $M = 2$ , 即当振动使得接收机收到光强降为中心光强的一半时作为判决门限, 从图3可以看出, 误码率随  $M$  增加而减小, 当振动幅度较大时, 变化较快, 振动幅度较小时, 误码率随  $M$  的变化而缓慢减小, 因此当振动强度很大时, 必须谨慎选择判决门限, 由于本文假设光源光功率足够大, 而且在接收端配置窄带原子滤光器可以滤除大部分的背景光, 实际上当发送“0”码时, 光功率不为零, 而且在强背景光干扰下, 误报概率不可能为零。因此如果选取过大的  $M$ , 会导致误报概率的上升, 结果使得系统的误码性能下降。

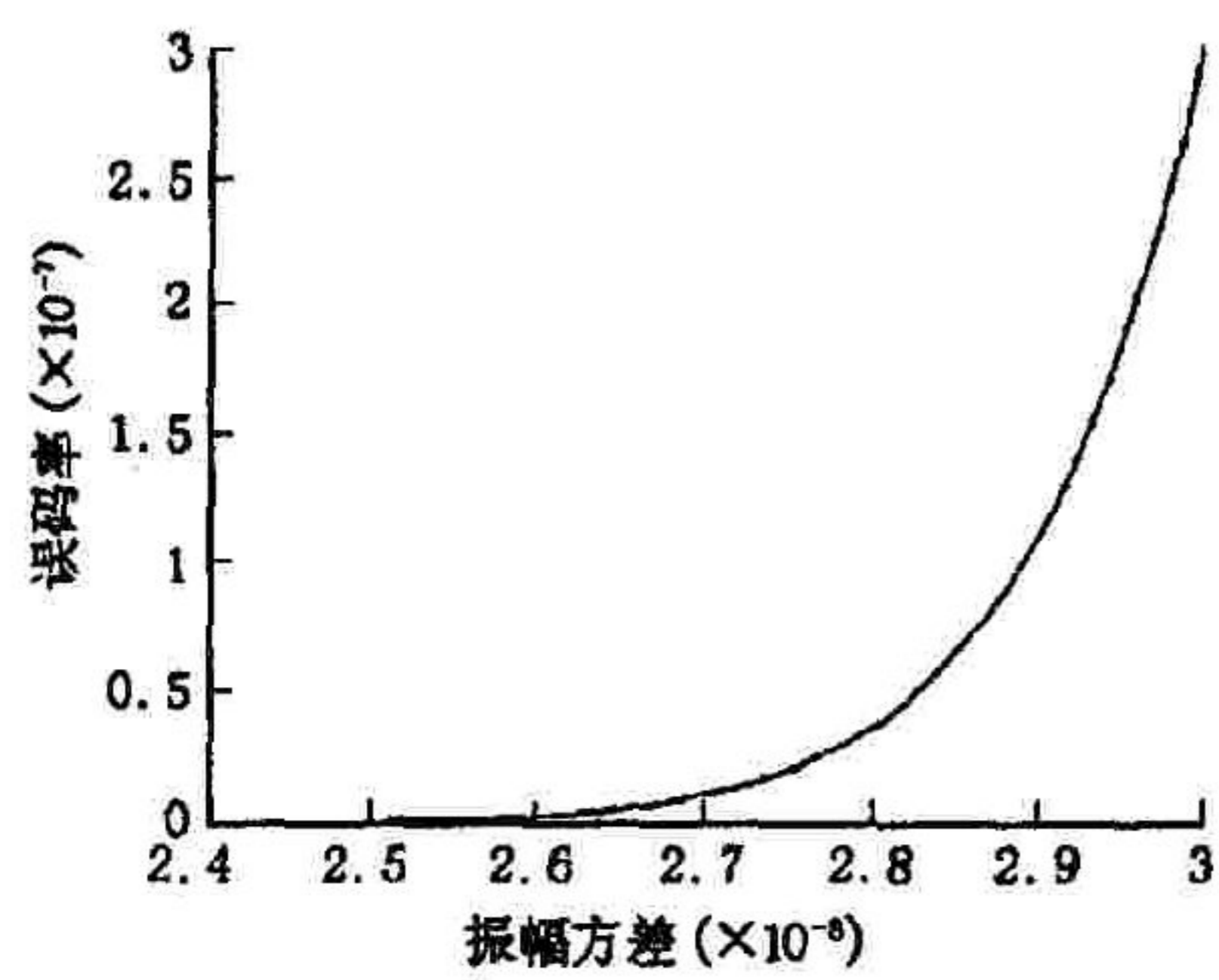


图1 振动幅度与误码率关系曲线图

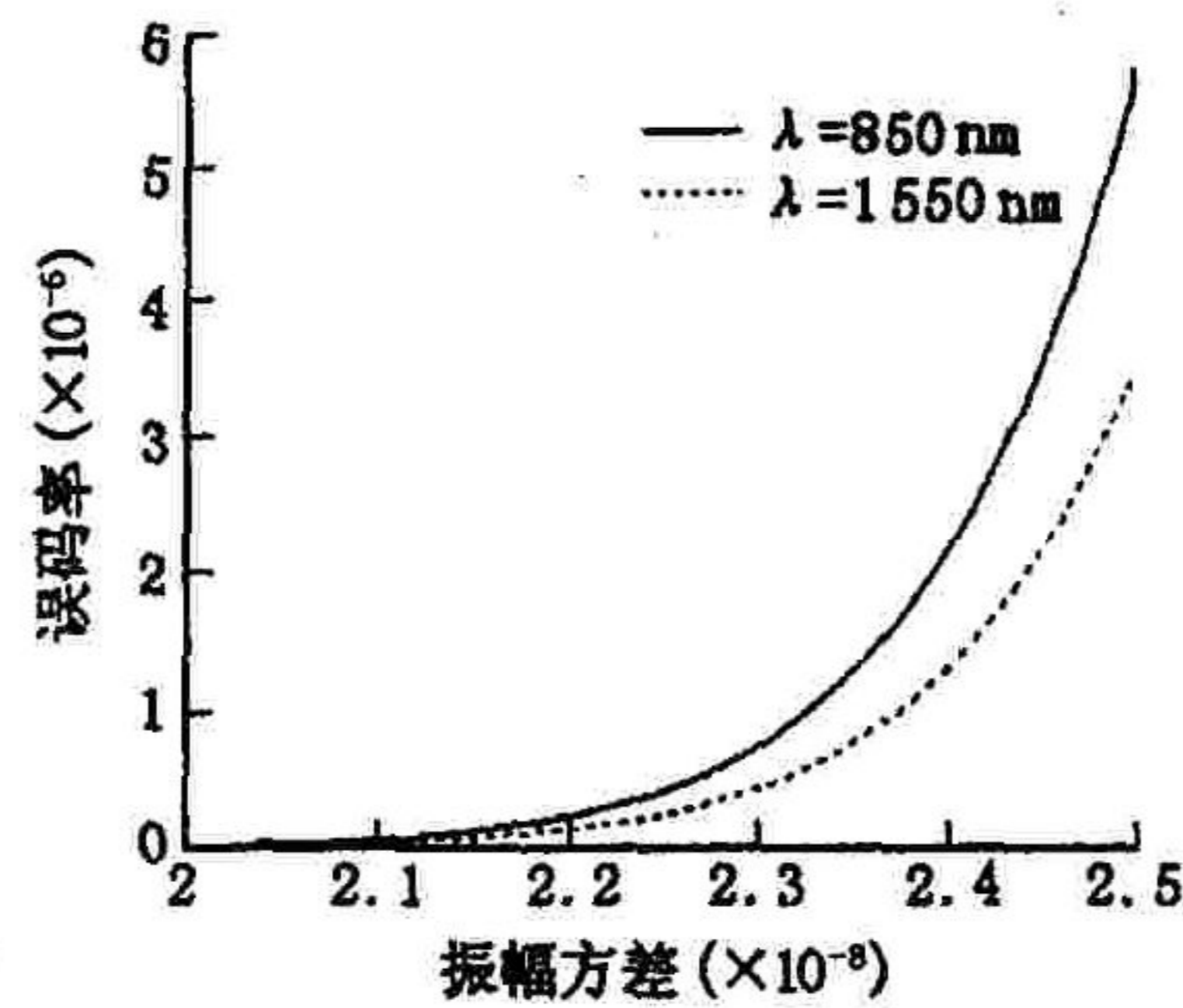


图2 不同波段时振动幅度与误码率关系曲线图

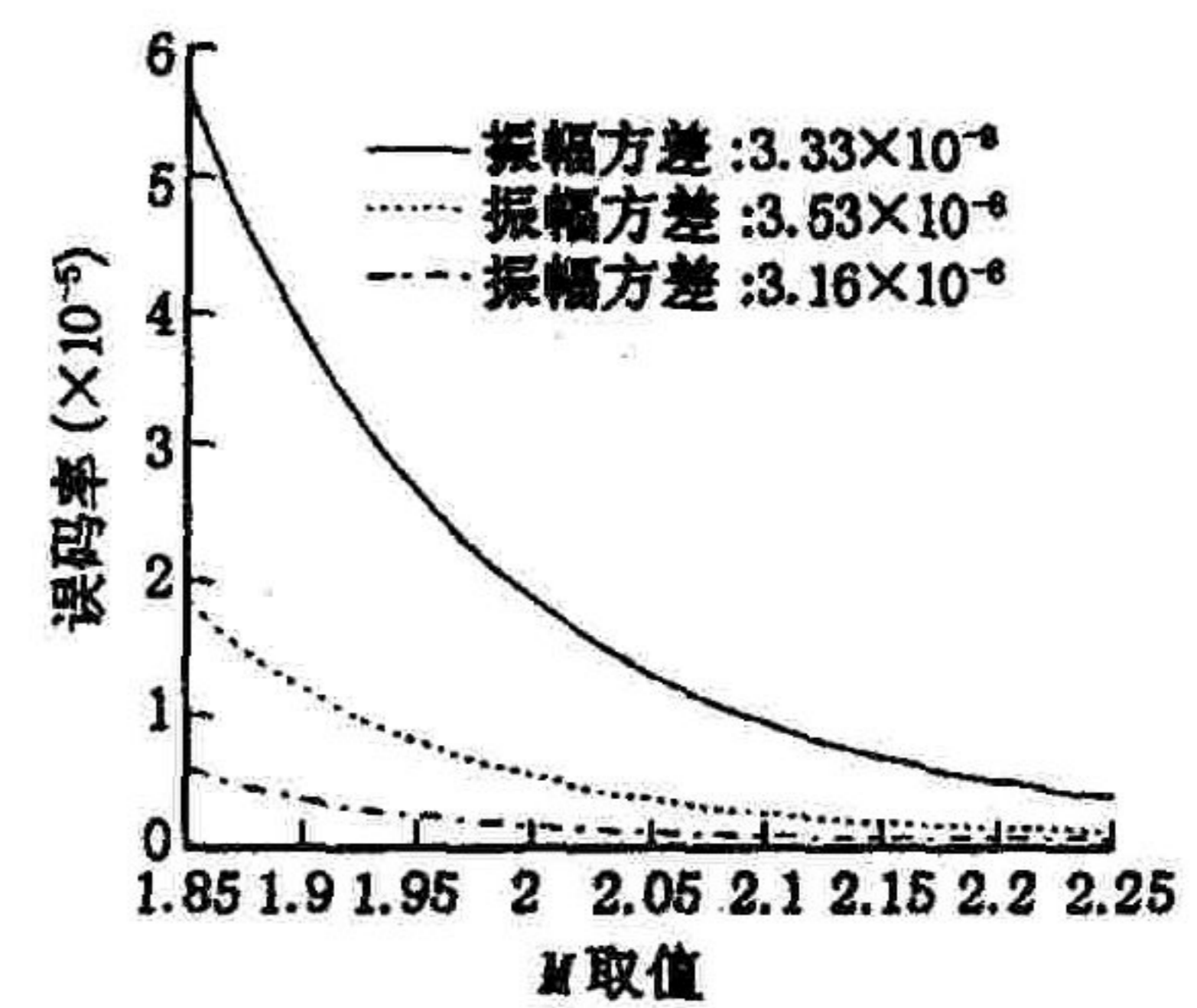


图3 不同振动幅度时M与误码关系曲线图

### 参考文献:

- [1] 周炳琨,高以智. 激光原理(第四版)[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [2] 马晶. 卫星光通信技术[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [3] Arnon S, Kopeika N S. Laser Satellite Communication Networks - Vibration Effects and Possible Solutions [J]. Proc IEEE, 1997, 85(8): 1646 - 1661.
- [4] Toyoshima M, Jono T, Nakagawa K, et al. Optimum Divergence Angle of a Gaussian Beam Wave in the Presence of Random Jitter in Free - Space Laser Communication Systems [J]. J Opt Soc Amer A, 2002, 19( 3): 567 - 571.
- [5] 马晶,谭立英. 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 - 81
- [6] Arnon S, Rotman S R, Kopeika N S. Bandwidth Maximization for Satellite Laser Communication [J]. Proc IEEE, 1999, 359(2): 675 - 681.
- [7] Kats G, Schlomi Arnon. Analysis of Optical Coherence Multiplexing Networks for Satellite Communication [J]. Proc IEEE, 2004, 3(5): 1536 - 1276.
- [8] Arnon S, Rotman S R, Kopeika N S. Optimum Transmitter Optics Aperture for Satellite Optical Communication [J]. Proc. IEEE, 1998, 34(2): 590 - 595.
- [9] 李勇军,李维民,王洪刚. 波长路由光网络阻塞概率分析[J]. 空军工程大学学报(自然版科学版),2004, 5(6): 47 - 50.
- [10] 赵尚弘. 卫星光通信导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.

(编辑:门向生)

Research on BER of Laser Satellite Communication System under Rayleigh Vibration

LI Yong - jun, ZHAO Shang - hong, XU Jie FANG Shao - qiang

(The Communication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077)

Abstract: Based on the achievement of link of laser satellite communication, the vibration of satellite platform with Rayleigh distribution is described, BER of optical communication of Gauss beam in IM / DD is computed, which can provide significant instruction for the design of laser satellite communication system.

Key words: Rayleigh vibration ; laser satellite communication; BER