

文章编号: 1001-3806(2002)01-0004-05

简化振动模型下空间光通信系统误码率分析

王 骐 马 晶 谭立英 韩琦琦

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 在空间光通信系统中, 由于卫星振动将对系统的误码率产生影响, 在探讨振动对误码率影响问题时, 应分析不同振动类型的影响问题。侧重分析了正弦振动, 并分别对方波、三角波、锯齿波型振动进行了分析。结果表明, 对于正弦振动, 当振动持续时间为整周期时, 误码率仅为振幅的函数, 此时误码率随振幅的增加迅速上升, 而与振动频率无关; 当振动持续时间为非整周期时, 误码率随时间的增加而起伏, 误码率的改变越来越小, 且趋于仅与振幅有关的常数。其它类型的振动也有类似的结果。

关键词: 振动; 误码率; 空间光通信**中图分类号:** TN292 **文献标识码:** A

Analysis of bit error rate in a space optical communication system under a simplified vibrating model

Wang Qi, Ma Jing, Tan Liying, Han Qiqi

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

Abstract: Because of the vibration of the satellite, the bit error rate (BER) will be influenced in a space optical communication system. The influence of different types of vibrations should be analyzed when discussing the influence of the satellite vibration on bit error rate. The satellite vibration is firstly simplified to a harmonic motion model. Then square-wave, triangle-wave and backle-wave types of vibrations are respectively analyzed. For sine vibration, the analyzing results show that BER is the function of vibration amplitude and has no relation with vibration frequency when the duration is full period. With vibration amplitude increasing, BER rapidly increases. When the duration is not full period, following increase of time, BER fluctuates and the change of BER is less and less and tendency a constant with amplitude.

Key words: vibration; bit error rate (BER); space communication

引 言

卫星通讯已经使得全球各地之间的通讯相当便利, 而正在得到迅猛发展的小卫星星座通讯网络更可以建立起全球实时通讯系统。为了能实现真正的实时、可移动全球通讯, 需要在各卫星之间建立起星间链路, 以利于通讯信号的高速传输。但现代社会对信息量的高速增长, 将使微波星间链路无法满足人们对通讯的需求。如果建立激光星间链路, 则可以在地球上不同地方实现更高速度、更高质量的实时通信。由于卫星间距离都较远, 而激光的发射功率又不可能很大, 为使通信能够进行, 空间光通信系统的光发射机发射的光束发散角很小, 这使空间光

通信的跟踪、瞄准难度变大。同时卫星的微小振动会造成发射光束的摆动, 使瞄准、捕获、跟踪问题更加复杂, 且会影响到通信的误码率。所以, 在空间光通信的研究中, 必须考虑卫星振动对其的影响。

由于卫星的恶劣工作条件和其它各种因素的影响使卫星的振动情况变得非常复杂。欧空局曾对卫星平台的振动进行了空间实测^[1], 利用地基激光雷达对卫星振动的测量也已经完成^[2,3], 其结果表明, 虽然卫星的振动情况非常复杂, 但在某些时间区域内其振动具有周期性或类周期性, 其振动函数可近似看作正弦振动、方波函数、三角函数、锯齿波函数中的一种或几种的叠加。为使问题尽量简化, 以利于对问题的分析, 我们首先将卫星振动简化为正弦振动进行着重分析, 然后分别对方波型振动、三角波型振动、锯齿波型振动进行分析。对较复杂的卫星振动情况, 可以认为是各种简谐振动的合成或各种简单振动类型的组合。

作者简介: 王 骐, 男, 1942 年出生。教授, 博士导师。近几年来从事激光雷达、相位共轭技术、短波长 X 光和空间光通信的研究。

收稿日期: 2000-10-26; 收到修改稿日期: 2001-02-27

1 光束的高斯能量分布下误码判据

空间光通信系统的光发射机安装在卫星平台上,卫星平台的微小振动会引起光发射机的振动,对通信产生影响的主要是光发射机的发射天线角振动。由于卫星间的距离很远,至少也有数千公里,甚至达数万公里,即使发射光束发生极微小摆动,也会使安装于相对卫星上的光接收机的接收天线相对发射光束中心有一个较大的位移。接收机所处发射光束横截面为接收面,发射光束的角振动相当于接收天线在接收面内做相应的振动。

如果发射光束横截面的能量分布是高斯分布,则由高斯光束特性可知,在接收面上各点的光振幅 U 与中心位置光振幅 U_0 的比值为:

$$U/U_0 = \exp(-\rho^2/\rho_0^2) \quad (1)$$

式中, ρ 为光束半径, ρ_0 为接收天线所在点距接收面中心的距离。

由于接收天线的半径很小,如在欧空局为静止轨道卫星间激光链路研制的空间光通信系统——SILEX 系统中为 $0.125\text{m}^{[4]}$,而在欧空局的小光学用户终端中天线的直径更小^[5],故在接收面上接收机可近似为一点。于是,接收机在任一点接收到的能量 P 与其在中心接收到的能量 P_0 的比等于各点的光振幅与中心位置光振幅的比 U/U_0 的平方,即:

$$P/P_0 = U^2/U_0^2 = \exp(-2\rho^2/\rho_0^2) \quad (2)$$

为了便于讨论,在下面的讨论中我们忽略其它噪声的影响,只考虑由于发射机的角振动所带来的影响。在一空间光通信系统中,如果发射机发射“0”码时的能量为 0,则无论发射光束如何摆动,接收机接收到的能量始终为 0,此时不会产生误码。但是,如果在发射“1”码时,接收机处在光束中心位置所接收到的能量为 P_0 ,当由于发射机的角振动使得光束摆动时,接收到的能量将会不同。若取 $P_1 = P_0/2$ 作为接收机用来判断接收到的是“0”码还是“1”码的阈值,设在 $P = P_1$ 的位置处,相应地有 $\rho = \rho_0$,从(2)式可知:

$$\rho_0 = \sqrt{\rho_0^2 \ln 2/2} \quad (3)$$

所以,在传输“1”码时,若接收机距离高斯光束中心的距离大于 ρ_0 ,则接收机接收到的能量会低于阈值 P_1 ,将“1”码误判为“0”码,产生误码,如图 1 所示。

卫星本体的振动一般比较复杂,为了简化分析过程,先对光发射机做正弦角振动的情形进行分析。当卫星上光发射机发射天线做频率为 f 的正弦角振动时,可看作接收机相对于高斯光束中心做位移为

$= A \sin 2\pi ft$ 的正弦振动,则在振动过程中接收机在各点接收到的能量 P 与其在中心接收到的能量比为:

$$P/P_0 = \exp(-2A^2 \sin^2 2\pi ft/\rho_0^2) \quad (4)$$

若将接收机在 $\rho = \rho_0$ 位置接收到的能量作为阈值,则当振动的振幅 $A < \rho_0/2$ 时无误码,即此时该振动对通信无影响;而当 $A > \rho_0/2$ 时将产生误码,如

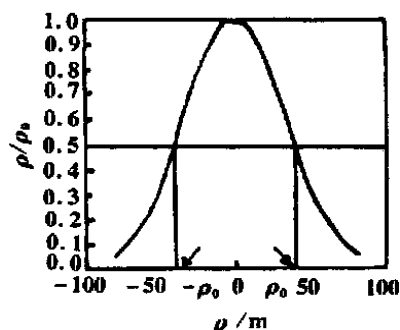


Fig. 1 The position of threshold on cross section of light beam

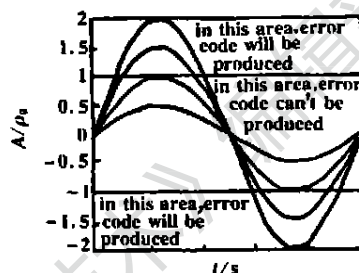


Fig. 2 The area generating code error

图 2 所示。其中横轴表示振动持续的时间,纵轴表示正弦振动的振幅 A 与 ρ_0 的比值。下面对卫星振动的位移、频率、持续时间

2 卫星平台正弦振动模型下振幅和频率对误码率的影响

设一个振动的位移小于阈值 ρ_0 的时间为 t_1 ,超过阈值的时间为 t_2 。当传播的为一单极性码,即一组等宽的 0,1 码元,且经过扰码时,0,1 码元数量大致相等,由于 0 码不会产生误码(不考虑其它噪声),所以,接收机在误码区内有一半时间不会产生误码,有一半时间会产生误码。故产生误码的时间 t 为接收机在误码区内的时间 t_2 的一半,则误码率 BER 可以用产生误码的时间与总时间之比来表示,即:

$$\text{BER} = \frac{t}{t_1 + t_2} = \frac{t_2}{2(t_1 + t_2)} \quad (5)$$

下面讨论在一整周期内振动的振幅、频率对误码率的影响。设一正弦振动振幅为 A ,频率为 f ,则周期 $T = 1/f$ 。如图 3 所示,当振动位移不超过 ρ_0 ,即图中的纵坐标不超过 1 时,不会产生误码。而能够产生误码的时间为 t_1 到 t_2 , t_3 到 t_4 共两段时间,而由正弦函数的性质可知:

$$\rho_0 = A \sin(\pi ft/2) \quad (6)$$

于是根据(5)式,可知振动持续时间为一个整周期时的误码率为:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} - \frac{\arcsin(\rho_0/A)}{\pi} \quad (7)$$

由此可以得到正弦振动的振幅与误码率的关系(见图4)。从图4可见,当振幅小于一定值时,不会产生误码,即此时振动处于

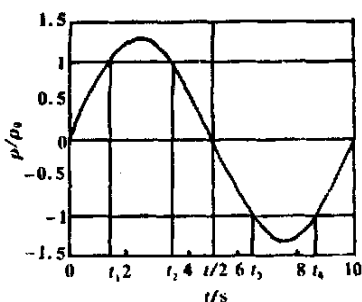


Fig. 3 Basic vibration

图2中不会产生误码的区域内;一旦振幅超过阈值,误码率将会急剧上升。

如选用占空比为 $1/n$ 的单极性归零码^[6],它与单极性

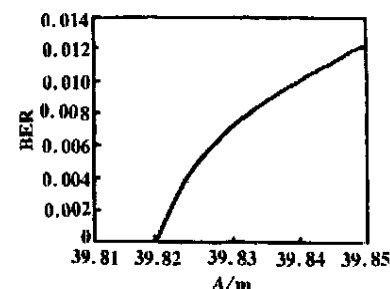


Fig. 4 The relation between amplitude and BER

码相比,在传送“1”码的时间区域内有 $1/n$ 的时间是“1”,剩下的时间归“0”。则选用这种码型时误码率变为选用单极性码时的 $1/n$,即:

$$BER = \frac{1}{n} \frac{1}{2} \arcsin(\sigma/A) \quad (8)$$

由(8)式可以得出误码率与码元占空比的关系,如图5所示。图5表明,随着占空比的增加,误码率呈线性增长。

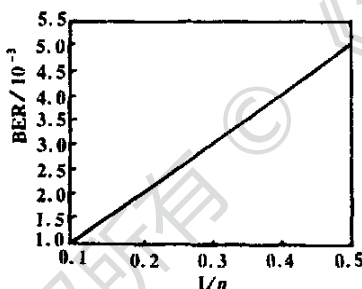


Fig. 5 Relationship between BER and proportion of empty

由(7)式及(8)式均可以看出,当振动的持续时间为周期的整数倍时,正弦函数型振动的频率 f 对误码率没有影响,即当振幅相同、振动持续时间也相同且为振动的整周期时,高频振动和低频振动对误码率的影响是一样的。

3 卫星平台振动时间对误码率的影响

以上讨论了振动的持续时间为整周期时,简谐振动的振幅及频率对误码率的影响。但振动的持续时间并不一定恰好为整周期,所以,下面讨论振动的持续时间对误码率的影响。

3.1 一个周期内的情况

下面讨论正弦振动的振动持续时间 t_d 小于一个周期时对误码率的影响,讨论中假定采用单极性码。如图3所示,由正弦函数的性质易求出 $p=0$ 时对应的时刻 t_1, t_2, t_3, t_4 。与前面推导整周期时误码率的方法相同,可求出当振动持续时间不同时所对应的误码率如下式所示:

$$BER = \begin{cases} 0 & 0 < t_d < t_1 \\ (1 - DT/t_d)/2 & t_1 < t_d < t_2 \\ (1/4 - D)T/t_d & t_2 < t_d < t_3 \\ (1 - 3DT/t_d)/2 & t_3 < t_d < t_4 \\ (1/2 - 2D)T/t_d & t_4 < t_d < T \end{cases} \quad (9)$$

式中, $D = \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sigma}{A}$ 。由(9)式可以得到当振幅 A 不变时,在一个周期内误码率与振动持续时间的关系图如图6所示,在此图中取周期为 $0.1s$ 。

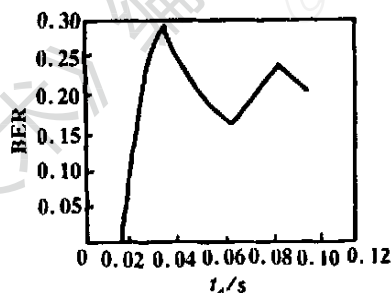


Fig. 6 Relationship between duration and BER when duration is smaller than a period

3.2 大于一个周期的情况

下面讨论振动持续时间超过一个振动周期,即 $t_d > T$ 的情况。设振动持续时间 $t_d = mT + \tau$, m 为自然数, $0 < \tau < T$ 。当 $\tau = 0$ 时,由于振动持续了整周期,误码率即为(7)式。而在 $\tau = 0$ 时,仍采用前面的推导方法,可得误码率的表达式:

$$BER = \begin{cases} \frac{mT(1-4D)}{2(mT+\tau)} & 0 < \tau < t_1 \\ \frac{mT(1-4D) + \tau - DT}{2(mT+\tau)} & t_1 < \tau < t_2 \\ \frac{mT(1-4D) + T/2 - 2DT}{2(mT+\tau)} & t_2 < \tau < t_3 \\ \frac{mT(1-4D) + \tau - 3DT}{2(mT+\tau)} & t_3 < \tau < t_4 \\ \frac{(m+1)T(1-4D)}{2(mT+\tau)} & t_4 < \tau < T \end{cases} \quad (10)$$

D 的表达式同前。由(10)式可得到振动持续时间超过一个周期时,误码率与振动的持续时间的关系曲线。当振动为周期的整数倍时,误码率由(7)式

给出,此时误码率与 m 无关。图 7 中给出了振动持续时间 $t_d = mT + \tau$ 中 m 分别为 1, 5, 10, 50 时, 与误码率的关系曲线, 仍取周期为 0.1s。

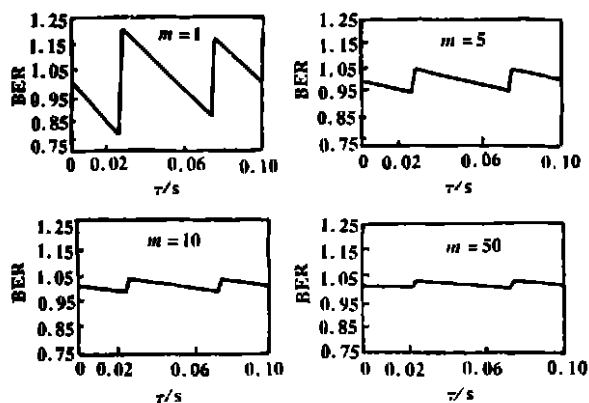


Fig. 7 Relationship between duration and BER

由图可知,随着 τ 的增加误码率有着上下起伏,但当 m 增大时,这种起伏在逐渐减小。事实上,当 m 趋于无穷时,(10)式趋于仅与振幅和阈值有关的量,即:

$$BER = \frac{1 - 4D}{2} \quad (11)$$

由此可知, m 趋于无穷时,误码率趋于与(7)式相同的量,即随着时间的增长,振动对误码率的影响主要取决于振幅的大小和阈值的选取。

4 其它几种基本振动对误码率的影响

方波、三角波、锯齿波型振动对误码率的影响与正弦振动的影响类似,可采用类似的方法讨论,下面简单讨论这几种基本振动对光通信误码率的影响。

4.1 方波型振动对误码率的影响

设方波振动的周期为 T ,在 t_1 到 T 时间内振幅持续为 A ,且振动位移为 A 与振动位移为 0 的时间之比是 $1/n = (T - t_1)/T$ 。当方波振动位移小于 θ_0 时,振动不会产生误码;当方波振动位移大于 θ_0 ,则在 t_1 到 T 的时间内将产生误码。仿前可推出方波振动持续时间在一个周期内的误码率为:

$$BER = \begin{cases} 0 & 0 < t_d < t_1 \\ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(n-1)T}{nt_d} \right] & t_1 < t_d < T \end{cases} \quad (12)$$

由此可得,方波振动持续时间在一个周期内时,振动持续时间与误码率的关系曲线,如图 8 所示,图中周期为 10s, $1/n = 1/2$ 。

对于振动持续时间大于一个周期的情况,可用前面的办法仍设振动持续时间为 $t = mT + \tau$,从而得出此时误码率为:

$$BER = \begin{cases} \frac{1 - mT}{2n mT + \tau} & 0 < \tau < t_1 \\ \frac{1 - (m - n + 1)T + n}{2n mT + \tau} & t_1 < \tau < T \end{cases} \quad (13)$$

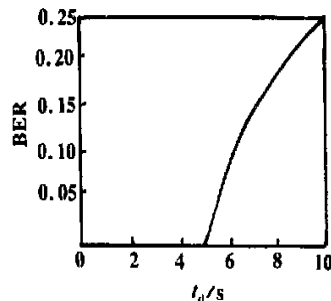


Fig. 8 Relationship between duration of square wave and BER when duration is smaller than a period

4.2 三角波型振动对误码率的影响

若三角波型振动的振幅大于阈值则将产生误码。设其周期为 T ,振幅为 A ,且 t_1 到 t_2 的时间段内位移大于 θ_0 ,所以,在这段时间内将产生误码。由此可以得到在一个周期内三角波型振动产生的误码率随振动持续时间变化的关系((14)式)及相应的曲线如图 9 所示,图中周期为 20s。

$$BER = \begin{cases} 0 & 0 < t_d < t_1 \\ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\theta_0 T}{2At_d} \right] & t_1 < t_d < t_2 \\ \frac{(A - \theta_0) T}{2At_d} & t_2 < t_d < T \end{cases} \quad (14)$$

对于振动持续时间超过一个周期的情况,采用与前面讨论所用的相同方法即可求得,在此不再赘述。

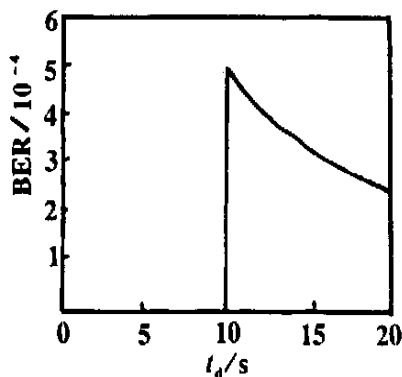


Fig. 9 Relationship between duration of triangular wave and BER in a period

4.3 锯齿波型振动对误码率的影响

锯齿波型振动只有在位移超过 θ_0 的起始时刻 t_1 到 T 这一段时间内会产生误码,则锯齿波型振动持续时间 t_d 小于一个周期时,其与误码率的关系如下:

$$BER = \begin{cases} 0 & 0 < t_d < t_1 \\ (1 - \sigma/A t_d)/2 & t_1 < t_d < T \end{cases} \quad (15)$$

相应曲线见图 10,其中 $T = 20s$,为了便于观察曲线变化情况,图中仅取 19.98s 到 20s 的一段。

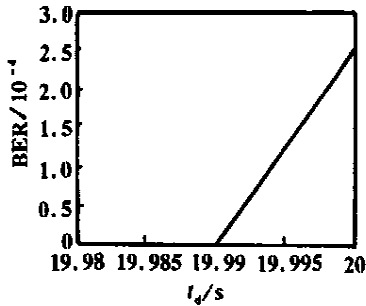


Fig. 10 Relationship between duration of sawtooth wave and BER in a period

而 t_d 大于一个周期时误码率为:

$$BER = \begin{cases} \frac{mT}{2(mT +)} \left(1 - \frac{\sigma}{A} \right) & 0 < t_1 \\ mT + - (m + 1) \frac{\sigma}{A} T & t_1 < T \end{cases} \quad (16)$$

图 11 为 $m = 10$ 时锯齿波型振动持续时间与误码率的关系曲线。不同 m 值所对应的曲线相似,只是随 m 的增加误码率所能达到的最低点上升,而由

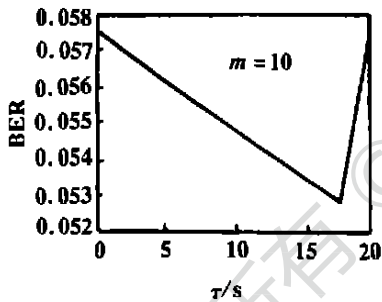


Fig. 11 Relationship between duration of sawtooth wave and BER when duration is longer than a period

(16)式可知,当 m 趋于无穷大时,误码率趋于常数 $(1 - \sigma/A)/2$ 。

4 结论

上述讨论中将卫星的振动简化为正弦振动、方波振动、三角波振动及锯齿波振动,并就振动的振幅、频率、持续时间等对误码率的影响进行了讨论,从中可以得到以下结论:

(1) 振动的振幅对误码率的影响:当振动持续时间为振动的整周期时,误码率仅为振幅的函数。振动的振幅小于阈值时,不会产生误码;当振幅超过阈值时,误码率随振幅的增加而迅速增加。

(2) 振动的频率对误码率的影响:当振动持续时间为整周期时,振动的频率对误码率没有影响。

(3) 振动的持续时间对误码率的影响:当振动的持续时间为非整周期时,误码率随振动持续时间的增加而波动,波动的范围随时间的增加而减小,误码率随时间的增加而趋于仅与振幅和阈值有关的量。

该项工作为我们进一步分析卫星的复杂振动对空间光通信的影响打下基础。同时,也为研究由于卫星振动引起的跟踪瞄准等问题的补偿方法等打下基础。

参考文献

- [1] Wittig M, Hltz L, Tunbridge D *et al.* SPIE Proc, 1994, 1218: 205 ~ 214.
- [2] Schultz KL, Kocher D G, Daley J A *et al.* Appl Opt, 1994, 33(12): 2349 ~ 2355.
- [3] Schultz KL, Fisher S. Appl Opt, 1992, 31(36): 7690 ~ 7695.
- [4] Oppenhauser G, Wittig M, Popescu A. SPIE Proc, 1991, 1522: 213.
- [5] Lutz H P. ESA Bulletin-Optical Communication in Space, 1997, 91: 25 ~ 33.
- [6] 王秉军, 孙学军, 沈保锁 *et al.* 现代通信系统原理. 天津: 天津大学出版社, 1991.

(上接第 3 页)

层厚度为 0.25 ~ 0.35mm 的表面白口铸铁层,其显微组织为莱氏体和树枝状结晶。树枝状结晶为转变了的初生奥氏体或初生渗碳体。热影响区为针状马氏体过渡到隐晶马氏体。(2) 白口铸铁层硬度高达 1200HV_{0.3},热影响区硬度为 710 ~ 780HV_{0.3}。(3) 采用高的激光密度、快的扫描速度,有助于白口铸铁层枝晶细化,能显著提高白口铸铁层的硬度。(4) 熔池的宽度主要由光斑直径决定,扫描速度主要影响熔

池的深度,对熔池宽度的影响不很强烈。(5) 磨损试验表明,激光合金化得到的白口铁层的抗磨粒 (Al₂O₃) 磨损性能比常规淬火处理的样品提高约 50%。

参考文献

- [1] Gnanamuthu D S. 激光科学与工艺, 1982, 13: 65.
- [2] Gnanamuthu D S. Laser Surface Treatment. In: Metzbowser E A ed. Application of Lasers in Materials processing, Material Park: OH Am Soc for metals, 1979: 177.
- [3] 李智, 马椿喻, 刘相华 *et al.* 材料科学与工程, 1999, 17(2): 81 ~ 84.