

振动和大气湍流对星地光通信链路性能的影响

刘涛^{1,2}, 赵尚弘^{1,2}, 方绍强¹, 石磊¹

(1. 空军工程大学-9/10工程学院, 陕西西安710077;

2. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安710068)

摘要: 在星地光通信下行链路中, 光束不仅受到卫星振动的影响, 还有大气湍流的影响。分析了卫星振动和大气湍流对星地光通信下行链路的联合影响, 结果表明, 即使很小的瞄准振动和大气湍流也会急剧降低通信性能。

关键词: 振动; 湍流; 误码率; 光通信

中图分类号: TN927 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)02-0055-03

在卫星光通信链路中, 光束瞄准抖动和卫星内部机械振动降低了平均接收光功率, 从而增加了误码率^[1-3]。在星地光通信链路中, 不仅存在振动的影响, 而且有大气的影响^[4-5]。在大气传输过程中, 由于温度梯度等的影响将引起大气折射系数的变化, 造成接收信号强度和相位的起伏, 进一步导致链路误码率的增加。本文分析了卫星振动和大气湍流对星地链路的联合影响。

1 振动模型

卫星通信系统中, 跟踪系统噪声和机械振动会引起光束的抖动。光束抖动可由服从独立高斯分布的方位和俯仰瞄准角来描述^[2,6]。

俯仰瞄准误差角可认为服从正态分布, 概率密度为

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

式中, θ_v , μ_v 和 σ_v 分别是俯仰瞄准角、均值和方差。

方位瞄准误差角也可看作正态分布, 概率密度为

$$f(\theta_H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_H} \exp\left(-\frac{(\theta_H - \mu_H)^2}{2\sigma_H^2}\right) \quad (2)$$

式中, θ_H , μ_H 和 σ_H 分别是方位瞄准角、均值和方差。

径向瞄准误差方差为

$$\sigma_\theta = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_H^2} \quad (3)$$

假设在水平和俯仰方向上对准误差是径向对称的, 则径向对准方差为

$$\sigma_\theta = \sigma_v = \sigma_H \quad (4)$$

径向对准误差服从瑞利分布:

$$f(\theta) = (\theta/\sigma_\theta^2) \exp(-\theta^2/2\sigma_\theta^2) \quad (5)$$

式(5)就是卫星一般振动模型。

收稿日期: 2004-09-07

基金项目: 西安电子科技大学国家重点实验室开放基金资助项目

作者简介: 刘涛(1976-), 男, 山东单县人, 硕士生, 主要从事空间光通信技术研究;

赵尚弘(1964-), 男, 甘肃临洮人, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光通信和光纤激光器技术研究。

2 大气湍流模型

湍流现象是大气折射系数随机变化的结果。折射系数变化由大气、陆地和海洋间温度梯度引起。通常用 Kolmogorov's 理论解释大气折射系数的随机行为。据此理论,折射系数可看作一常数项和随机项之和。

$$n_T(t) = n_0 + n(r) \quad (6)$$

式中, n_0 是平均折射系数, r 是空间位置, $n(r)$ 是有压力、温度和湿度的空间变化产生的折射率的随机起伏项。描写湍流统计的三维维纳谱是

$$\Phi(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3} \quad (7)$$

式中, C_n^2 是大气折射系数结构常数, K 是表示空间频率的矢量波数。 K 满足不等式 $2\pi/L_0 < K < 2\pi/l_0$, 其中 l_0 和 L_0 分别是湍流内尺度和湍流外尺度。 C_n^2 值从强湍流的 $10^{-13} m^{-2/3}$ 到弱湍流的 $10^{-17} m^{-2/3}$ 之间变化。

用 X 表示湍流振幅起伏。在信号衰减的统计模型中, 传输路线的长度 Z 满足条件 $l_0 < \sqrt{Z\lambda} < L_0$, λ 是波长, 湍流直径 $d_0 \approx \sqrt{Z\lambda}$ 。由于大气层离地面相对较近, 所以其对上行链路和下行链路的影响是不同的。这里仅考虑下行链路。假定下行链路光束为无限平面波。因为光束大部分在自由空间传输, 所以仅在地面附近受湍流影响。星地光通信下行链路中, 对于无限平面波及 C_n^2 沿路程为变量的情况, 其振幅起伏的方差为

$$\sigma_X^2(Z) = 0.56(2\pi/\lambda)^{7/6} \int_0^Z C_n^2(x) (Z-x)^{5/6} dx \quad (8)$$

X 的密度分布函数服从正态分布, 见式(9)。和 X 有关的归一化接收功率为式(10)。

$$f_X(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \exp\left(-\frac{(X-E[X])^2}{2\sigma_X^2}\right) \quad (9) \quad I = \exp(2X - 2E[X]) \quad (10)$$

3 通信系统

3.1 链路预算

接收机接收光信号可由下式表示:

$$P_R(\theta, I) = P_T \eta_T \eta_R (\lambda/4\pi Z)^2 G_T G_R L_A L_T(\theta) I \quad (11)$$

式中 P_T 是发射功率, η_T, η_R 分别是发射机和接收机的光接收系数, λ 是波长, G 是光放大器增益, Z 是收发机间距离, 括号中是自由空间损耗, G_T, G_R 分别是发射机和接收机天线增益, L_A 是大气损耗。 $L_T(\theta)$ 是发射机瞄准损耗因子, 服从高斯分布。

$$L_T(\theta) \approx \exp(-G_T \theta^2) \quad (12)$$

式中 θ 是径向瞄准误差角。

3.2 误码率

在 OOK 链路中采用强度调制/直接探测(IM/DD)。接收机在一个比特周期内对接收信号积分, 然后判决接收到的是“1”还是“0”。把判决前的信号定义为 y 。假定噪声为附加高斯白噪声, 并且统计独立于接收信号, 具有零均值和方差 σ_N^2 。信号在发射“1”或“0”时, 分别由下面条件概率密度表示:

$$P(y/on, \theta, I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left[-\frac{(y - R_{PD} P_R(\theta, I))^2}{2\sigma_N^2}\right] \quad (13) \quad P(y/off) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (14)$$

在通信系统中, 大多数情况下发射“1”和“0”的概率相同, 即 $P(on) = P(off) = \frac{1}{2}$ 。由最大后验概率算法, 则似然函数为

$$\Lambda(y, \theta, I) = \frac{P(y/on, \theta, I)}{P(y/off)} = \exp\left[-\frac{-2yR_{PD}P_R(\theta, I) + (R_{PD}P_R(\theta, I))^2}{2\sigma_N^2}\right] \quad (15)$$

上式两边取自然对数, 消除同因子, 整理后得:

$$L\Lambda(y, \theta, I) = y - R_{PD}P_R(\theta, I)/2 \quad (16)$$

误码率为

$$BER = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} [P(\text{on})P(\text{off/on}, \theta, I) + P(\text{off})P(\text{on/off}, \theta, I)] f_{\theta}(\theta) f_X(X) d\theta dX \quad (17)$$

式中

$$P(\text{off/on}, \theta, I) = \int_{LA(y, \theta, I) < 0} P(y/\text{on}, \theta, I) dy \quad (18) \quad P(\text{on/off}, \theta, I) = \int_{LA(y, \theta, I) > 0} P(y/\text{off}, \theta, I) dy \quad (19)$$

为了简化式(17),定义

$$\alpha = P_T G_T \frac{R_{PD}}{2\sqrt{2}\sigma_N} \eta_T \eta_R \left(\frac{\lambda}{4\pi Z}\right)^2 G_R L_A G \quad (20)$$

并令

$$u = \theta^2 / 2\sigma_{\theta}^2 \quad (21) \quad v = (X - E[X]) / \sqrt{2}\sigma_X \quad (22)$$

误差函数定义为

$$\text{erfc}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_a^{\infty} \exp(-b^2) db \quad (23)$$

计算整理后,方程(17) 化简为

$$BER(\sigma_X, G_T \sigma_{\theta}^2) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \text{erfc}[\alpha \cdot \exp(-2uG_T \sigma_{\theta}^2 + 2\sqrt{2}\sigma_X v)] \exp(-u - v^2) dudv \quad (24)$$

4 数值分析

对式(24)模型进行数值分析。图1和图2分别显示了BER与振动参数 $G_T \sigma_{\theta}^2$ 和湍流参数 σ_X 之间的关系。图1描述了在 σ_X 分别为0、0.2、0.5时, BER与 $G_T \sigma_{\theta}^2$ 的关系。可以看出,对强湍流 $\sigma_X = 0.5$ 时, BER始终很大,对振动的的影响不是太敏感。对弱湍流 $\sigma_X = 0$ 或0.2时,在 $G_T \sigma_{\theta}^2$ 较小时 BER也很小,在 $G_T \sigma_{\theta}^2$ 大于0.3时, BER几乎不受湍流变化影响。

图2描述了BER作为 σ_X 的函数,在 $G_T \sigma_{\theta}^2$ 分别取0、0.05、0.3时, BER与 σ_X 的关系。易看出,在 $G_T \sigma_{\theta}^2$ 为0.3时, BER几乎为常数, σ_X 在0~0.5之间变化时几乎对BER没影响。对较低振动值, BER随湍流增加。振动为0.05时, BER最小达到 10^{-7} ; 无振动及湍流 σ_X 小于0.09时, BER可小于 10^{-8} 。

数值分析结果表明,很小的瞄准振动和大气湍流也会急剧降低通信性能。如果振动小于0.1,在弱湍流情况下,可得到小于 10^{-9} 的误码率,但当湍流增加时,仅仅微小的抖动可使误码率高于 10^{-9} 。由图1和图2也可看出,一旦抖动高于0.1或湍流在0.4以上时,这时参数变化成为主要影响因素, BER可达到 10^{-2} 甚至更高,振动和湍流相互影响也明显减小。

参考文献:

[1] Arnon S, Kopeika N S. Laser Satellite Communication Networks - Vibration Effects and Oossible Solutions. Proceedings of IEEE, 1997, 85(10):1646 - 1661.
 [2] Chien - Chung Chen. Impact of Random Pointing and Tracking Errors on The Design of Coherent and Incoherent Optical Intersatellite Communication Links[J]. IEEE Transactiong on Communications, 1989, 37(3):252 - 260.
 [3] Shlomi Arnon, Norman S, Kopeika. Performance Limitation of Free - Space Optical Communication Satellite Networks Duo to Vibration - Analog Case[J]. Opt. Eng, 1997, 36(1):175 - 182.
 [4] Arnon S. The Effects of Atmospheric Turbulence and Building Sway on Optical Wwireless Communication Systems[J]. Optics Letters, 2003, 28(2):129 - 131.

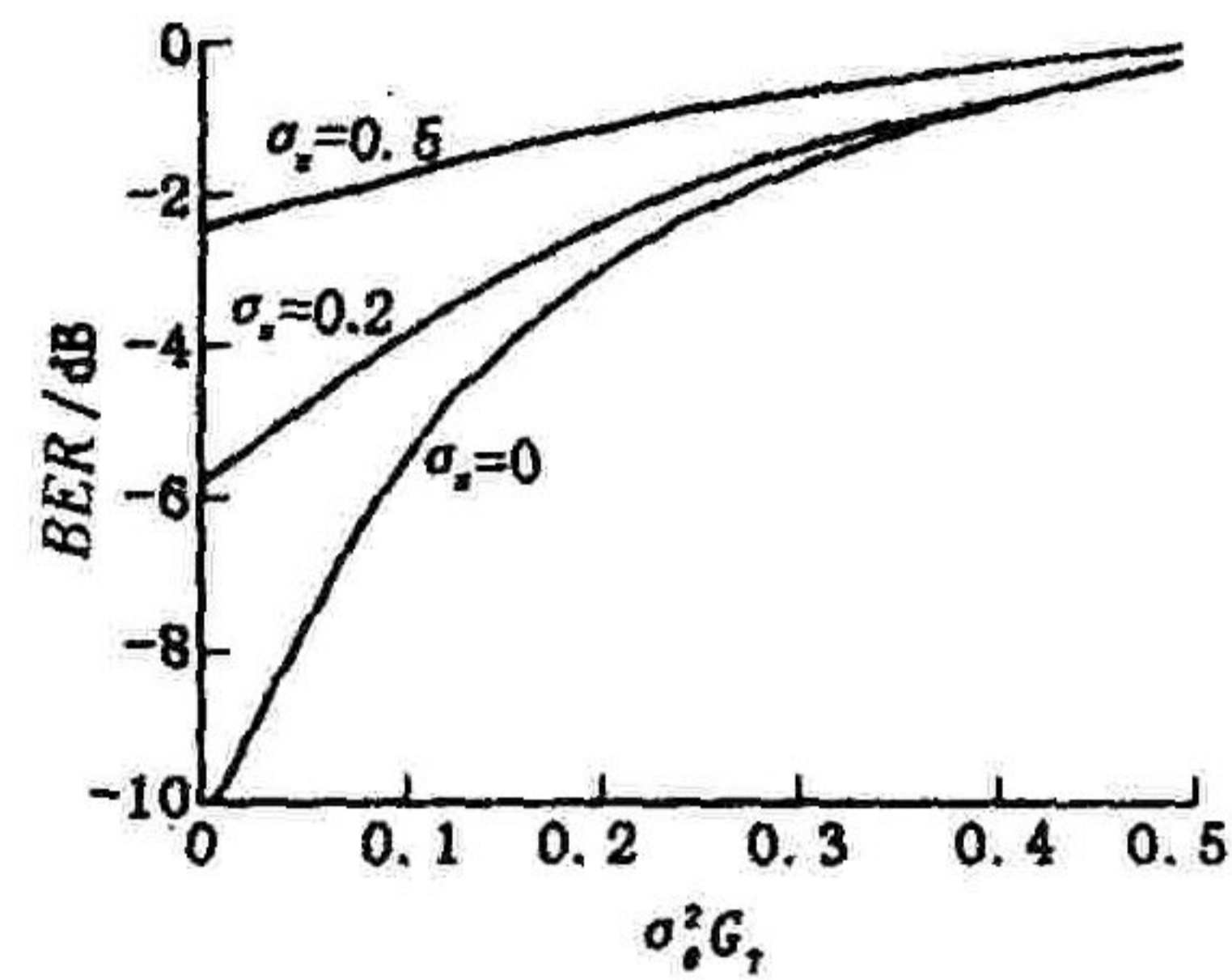


图1 BER与振动参数 $\sigma_{\theta}^2 G_T$ 的关系

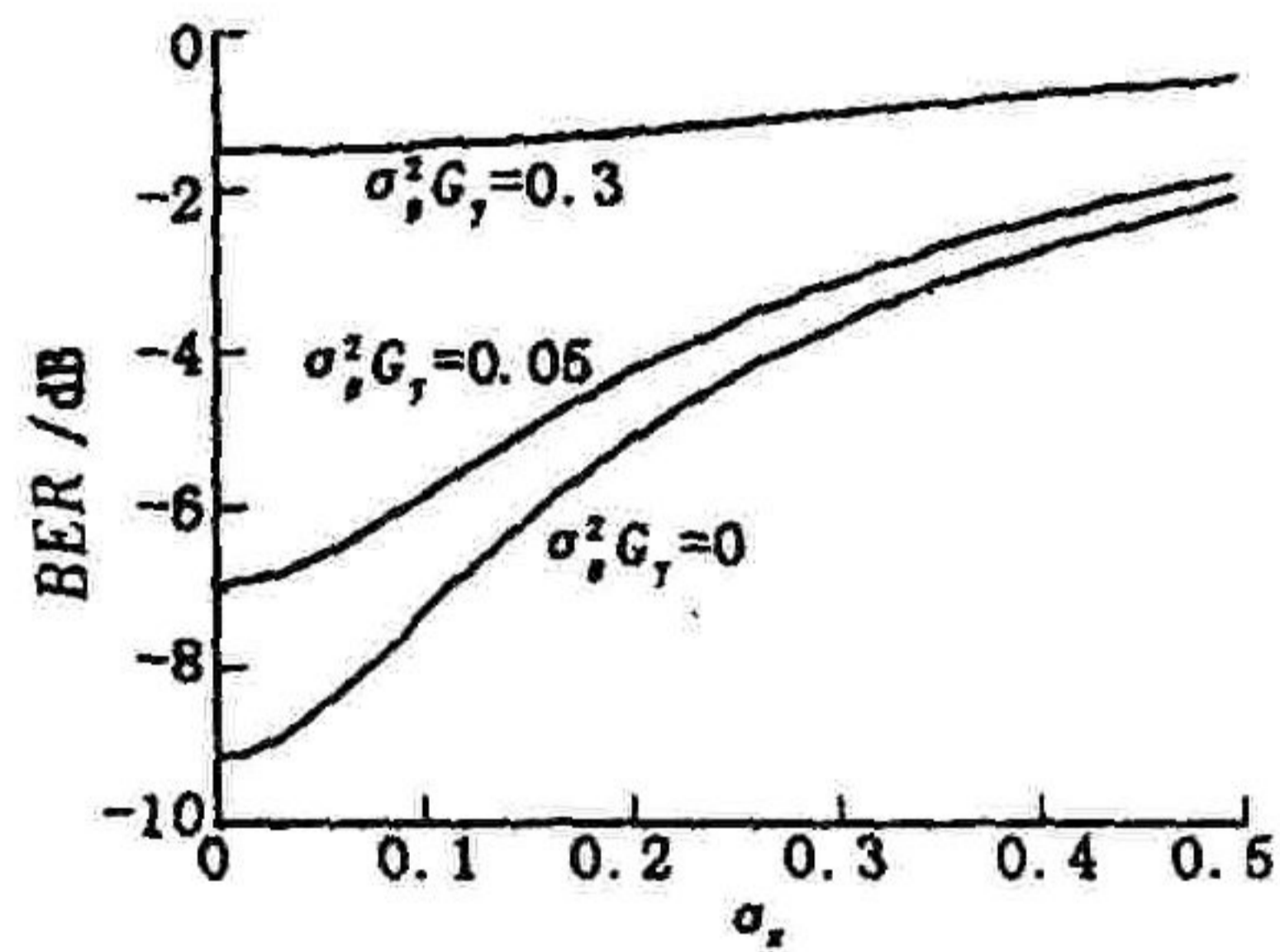


图2 BER与湍流参数 σ_X 的关系