

### 大气抖动自由空间光通信信道研究

李晓亮, 门健, 夏军利

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要: 光在大气中传播时, 由于受到复杂的气象条件的影响, 实际上接收机接收到的信号是一个随机信号, 在时间和空间上都有一定相关性。对大气强抖动和弱抖动模式下空间光信道衰减模型做了深入分析, 并用似然检测分析了系统性能。

关键词: 空间光通信; 大气信道; 抖动

中图分类号: TN929 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)05-0051-02

空间光通信无论何种链路都要受到大气对激光束的影响。大气温度、强度和折射系数的变化会导致接收机光信号的起伏变化, 严重影响 FSO 系统的性能。激光在大气中的衰减主要由气溶胶粒子和大气分子的吸收和散射<sup>[1-2]</sup>。在高空中稀薄的空气和稳定的气象条件, 近视于激光在真空中的传播, 只有光强随传输距离的衰减; 在星地链路中, 其上行链路(Uplink)和下行链路(Downlink)的传输特性不一致而且由于受到不同气候条件的影响, 其传播特性非常复杂, 像大气粒子的散射、折射和吸收导致光波波前失真、相位畸变和光波闪烁。大气气团直径大于光波波长时, 折射率差使得光束发生弯曲, 从而导致接收光强偏离接收机中心, 当大气分子直径等于或小于光波波长时, 造成多径传播, 使得接收机光功率发生起伏。

## 1 接收机模式

接收机模式可用式  $r = \eta(I + I_b) + n$  表示, 其中  $r$  是接收到的信号,  $\eta$  是光电转换效率,  $I$  和  $I_b$  分别是信号和背景光强,  $n$  是具有均值为 0、方差为  $N_0/2$  的附加高斯白噪声, 假设背景广场恒定,  $r = \eta(I + I_b) + n = \eta I + (\eta I_b + n) = I_s + n_l$ , 其中  $I_s = \eta I$ ,  $n_l$  为均值为  $\eta E_b$ 、方差为  $N_0/2$  的高斯噪声, 且它们相互独立。 $I$  的概率密度函数为  $f_I(I)$ , 则  $I_s$  的概率密度函数  $f_{I_s} = f_I(I_s/\eta)/\eta$ 。在 OFK 调制方式中, 有信号时发送“1”码, 否则发送“0”码, 即:  $H_1: r = I_s + n_l, H_0: r = n_l$ 。所以有

$$p(r | H_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{(r - \eta I_b)^2}{N_0}\right) \quad ; \quad p(r | H_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{I_s, n_l}(i_s, r - i_s) di_s, \text{似然比 } \Lambda(r) = \frac{p(r | H_1)}{p(r | H_0)}$$

$$\text{系统误码率 BER} = \int_{\Lambda(r) < 1} p(r | H_1) dr + \int_{\Lambda(r) > 1} p(r | H_0) dr, \text{系统信噪比 } \frac{S}{N} = \frac{E[I_s^2]}{N_0}$$

## 2 弱抖动信道模式

大气环境中光场由 Rytov 模式描述,  $u(r) = A(r) \exp(i\phi(r)) = u_0(r) \exp(\Phi_1)$ ,  $u_0(r) = A_0(r) \exp(i\phi_0(r))$ ,  $u_0$  是没有大气环境影响时的光场, 大气抖动因子  $\Phi_1 = \log\left[\frac{A(r)}{A_0(r)}\right] + i[\phi(r) - \phi_0(r)] = X + iS$ ,  $X$  和  $S$  相互独立且服从高斯分布,  $X$  的概率密度函数为  $f_X(X) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(X - E(X))^2}{2\sigma_x^2}\right\}$ , 空间光通信系统

收稿日期: 2006-03-06

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 李晓亮(1981-), 男, 山西原平人, 硕士生, 主要从事光通信与组网技术研究。

的光源一般为高斯光束,它的场强从中心沿径向指数衰减, $I = I_0 \exp(2X - E(X))$ ,从而接收到的光强也是一随机变量,其概率密度函数为  $f_I(I) = \frac{1}{2I(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) - \ln(I_0)]^2}{8\sigma_x^2}\right\}$ 。

$$\text{则 } f_{I_s}(I_s) = \frac{1}{\eta} f_I\left(\frac{I_s}{\eta}\right) = \frac{1}{2I_s(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\ln I_s - \ln \eta - \ln I_0)^2}{8\sigma_x^2}\right)$$

$$p(r | H_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{I_s, \eta}(i_s, r - i_s) di_s = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{I_s}(i_s) \frac{1}{(\pi N_0)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(r - i_s - \eta I_s)}{N_0}\right) di_s$$

空间光通信系统中,下行链路可用一平面波来精确描述,而上行链路可近视为球面波,其抖动方差平面波为: $\sigma_x^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} R^{11/6} (l_0 \ll \sqrt{\lambda L} \ll L_0)$  或  $\sigma_x^2 = 12.8C_n^2 k^{7/6} R^{11/6} (l_0 \gg \sqrt{\lambda L} \gg L_0)$ ; 球面波。为  $\sigma_x^2 = 0.496C_n^2 k^{7/6} R^{11/6} (l_0 \ll \sqrt{\lambda L} \ll L_0)$  或  $\sigma_x^2 = 1.28C_n^2 k^{7/6} R^{11/6} (l_0 \gg \sqrt{\lambda L} \gg L_0)$ 。

### 3 强抖动信道模式

上面的对数正态分布只有在当  $\sigma_{\ln}^2 < 0.3$  时成立,称之为弱抖动模式,对数正态分布广泛用来分析弱抖动条件下激光束的光强,当  $25 < \sigma_{\ln}^2 < 100$  时,称之为强抖动,此时 Rytov 模式不再适应,用一种 K 分布来描述强抖动条件下光强概率密度,大量的实验证明这种描述和实际分布的结果非常吻合。在 K 模式中,瞬时光强由两个独立分布的随机变量相乘而得,即  $I = yz$ , 其中  $y$  和  $z$  分别服从指数分布和伽玛分布。

$$f_y(-y) = \begin{cases} \exp(-y), & y > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad f_z(z) = \frac{\alpha z^{\alpha-1} \exp(-\alpha z)}{\Gamma(\alpha)}, z > 0. \quad \Gamma(\cdot) \text{ 是伽玛函数, } \alpha \text{ 是信道参数, 它}$$

和离散散射体的有效数相关。光强概率密度函数  $f_I(I) = \frac{2}{\Gamma(\alpha)} \alpha^{\frac{(\alpha+1)}{2}} I^{\frac{(\alpha-1)}{2}} K_{\alpha-1}(2\sqrt{\alpha I}), I > 0$ , 其中  $K_\alpha(\cdot)$

是  $\alpha$  的第二类修正贝塞尔函数。  $f_{I_s}(I_s) = \frac{1}{\eta} f_I\left(\frac{I_s}{\eta}\right) = \frac{2}{\eta \Gamma(\alpha)} \alpha^{\frac{(\alpha+1)}{2}} \left(\frac{I_s}{\eta}\right)^{\frac{(\alpha-1)}{2}} K_{\alpha-1}\left(2\sqrt{\alpha \frac{I_s}{\eta}}\right), I_s > 0$ 。

### 4 结束语

在分析空间光通信系统性能时,许多文献把接收机接收到的信号作为一个确知信号加上一个附加高斯白噪声分析,实际上光束由天线发射出去,经过大气信道的吸收、散射、折射后,接收机信号是一个随机变量,所以应用统计信号处理的方式处理<sup>[3]</sup>。本文在假设信号的瞬时衰减未知,信号概率密度已知条件下,对弱抖动和强抖动两种模式作了分析,用似然检测的方法研究了系统的误码性能。

#### 参考文献:

- [1] Uysal M, Li J. Error Rate Performance of Coded Free - Space Optical Links Over Gamma - Gamma Turbulence Channels [J]. IEEE International Conference on Communications, 2004, 27(1): 3331 - 3335.
- [2] 刘涛, 赵尚弘, 方绍强, 等. 振动和大气滞流对星地光通信链路性能的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 55 - 57.
- [3] 梁俊, 袁小刚, 杨芳, 等. 通用数据链路传输信道分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 58 - 61.

(编辑: 门向生)

Research on Channel of Free - space Optical Communication under Atmosphere Turbulence

LI Xiao - liang, MEN Jian, XIA Jun - li

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

Abstract: When laser transmits in atmosphere, the factually received signal is a random variable, which has the coherence in time and space. The model of the optical channel in strong and weak turbulences is analyzed, the system performance is studied by maximum probability detection.

Key words: free - space optical communication; atmosphere channel; turbulence