

# 雾对大气激光通信系统的影响及克服方法\*

王勇, 于蕾, 张雅彬, 曹家年

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:**分析了雾产生的原因、相关数学模型及其对大气激光通信系统的影响. 为了克服雾对无线光通信链路的影响, 将 LDPC 码作为信道编码应用到大气激光通信系统中, 并结合置信传播迭代译码算法和副载波 PSK 强度调制方案, 在有雾的大气信道中进行了仿真. 仿真结果表明: LDPC 码具有优越的纠错能力, 并获得了较大的编码增益, 该方案可以满足大气激光通信系统的需要.

**关键词:**大气激光通信; 雾衰减; 低密度校验码; 置信传播迭代译码算法

**中图分类号:** TN929.12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)12-3275-4

## 0 引言

大气激光通信是以激光束作为信息载体, 在大气中进行信息双向传输的一种宽带通信技术<sup>[1]</sup>. 由于其可提供使用的带宽非常宽、发射光束窄, 抗电磁干扰能力强等优点, 它是目前大容量空间通信最具竞争力的解决方案. 由于激光的传输媒质是大气, 大气中的各种自然现象都会对激光信号产生影响. 雾<sup>[2-3]</sup>是这些自然现象中的一种, 它会使光信号产生严重的衰减, 信噪比降低, 系统误码率增加, 严重时会使光通信链路中断. 因此必须采取措施来克服雾对大气激光通信系统的影响, 其中比较有效的方法就是增加信道编码.

低密度奇偶校验码 (Low Density Parity Check, LDPC) 码是一种基于稀疏矩阵的线性码, 也是目前距离 Shannon 限最近的码, 具有极强的纠错能力. 由于 LDPC 码的研究主要集中在电子通信领域, 对于 LDPC 码在大气激光通信中的研究报道较少. 本文将 LDPC 码作为信道编码应用到大气激光通信系统中, 用来克服雾对系统性能的影响, 并对采用 LDPC 纠错码前后的系统性能进行了分析比较.

## 1 信道模型

由于各种可能存在的障碍和对各种现象数学模型的分歧, 所以对大气激光通信信道<sup>[4-5]</sup>建立统一的数学模型是一个相当复杂的问题. 当激光通过大气层时, 部分光会被吸收, 部分光会被散射, 这样大气激光通信链路就会受到很大的损害. 大气层是由各种不同的分子和小的悬浮微粒组成, 它们与光相互作用会产生各种各样的现象: 频率选择性衰减、吸

收、散射和闪烁.

其中雾引起的光信号衰减对大气激光通信系统性能影响较大. 雾是由大量悬浮在空气中的小水滴组成. 在气象学中对雾是这样解释的: 能见度小于 1 km, 并且空气的相对湿度达到了饱和状态. 根据雾形成的机制, 各种类型的雾是能够被区分的. 在自然界中最常见到的只有两种雾: 一种是辐射雾; 另一种是平流雾.

目前存在一些相关雾的数学模型, 通过它们可以计算出不同光波长引起的光信号衰减. 在这些模型当中, 有两个模型被广泛使用, 一个是 Kruse 模型, 另一是 Kim 模型. 由雾引起的光信号衰减可以表示为<sup>[6]</sup>

$$\alpha_{\text{spec}} = \frac{10 \log B}{V} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (1)$$

式中,  $V$  为能见度变量,  $\lambda$  为激光通信采用的光波波长,  $B$  为传输阈值,  $q$  表示雾引起的光信号衰减对光波长的依赖程度. Kruse 模型采用的  $q$  值如式 (2), Kim 模型采用的  $q$  值如式 (3).

$$q = \begin{cases} 1.6 & (V > 50 \text{ km}) \\ 1.3 & (6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}) \\ 0.585V^{1/3} & (V < 6 \text{ km}) \end{cases} \quad (2)$$

$$q = \begin{cases} 1.6 & (V > 50 \text{ km}) \\ 1.3 & (6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}) \\ 0.16V + 0.34 & (V < 6 \text{ km}) \\ V - 0.5 & (0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}) \\ 0 & (V < 0.5 \text{ km}) \end{cases} \quad (3)$$

Kim 模型与 Kruse 模型最大的不同点是 Kim 模型认为当能见度小于 500 m 时, 雾引起的光信号衰减与所使用的光波长的大小无关. 图 1 给出了 Kruse 模型和 Kim 模型的衰减曲线.

雾会增加光信号的衰减, 可以把雾引起的光信号的衰减看成是一种乘性干扰. 在一个相当长的时

\* 国家自然科学基金(60602007)资助

Tel: 0451-82519801 Email: wangyong@hredu.edu.cn

收稿日期: 2009-05-11

修回日期: 2009-06-24

间段内,雾对光信号的衰减程度总是变化的,大体上服从高斯分布<sup>[7]</sup>.因此,可以把雾衰减看成是一个具有高斯分布的乘性干扰信道.

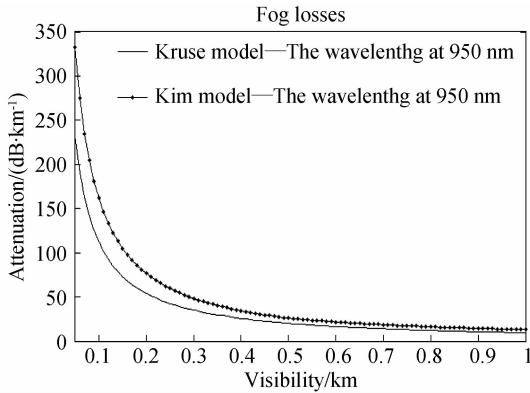


图1 雾的仿真模型  
Fig. 1 Fog simulation model

## 2 调制方式

图2给出了数字副载波强度调制系统框图,输入的数字信息比特先被调制 RF 副载波上,再用副载波对光载波进行强度调制,在大气信道中传输.在接收端,首先通过光检测装置恢复调制的副载波信号,副载波的谱必须全部在探测器的带宽内.恢复的副载波信号与探测器的噪声一起馈入到副载波解调信道,通过标准的 RF 电子电路对副载波进行解调,恢复数字比特信息.

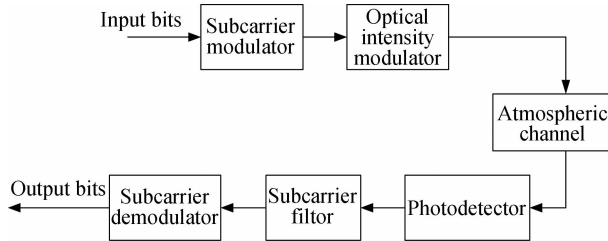


图2 副载波强度调制系统  
Fig. 2 Sub-carrier intensity modulation system block diagram

在众多副载波强度调制方法中,副载波相移键控(Phase-Shift keying, PSK)强度调制<sup>[8]</sup>是一种非常有效地克服大气环境影响的调制方法.许多文献和实验已经证实了在复杂多变的大气信道环境下,副载波 PSK 强度调制的性能要优于开关键控(On-Off keying, OOK).

在副载波 PSK 强度调制系统中,光发射机发出的光强为

$$s(t) = 1 + \alpha [s_i(t) \cos 2\pi f_c t + s_q(t) \sin 2\pi f_c t] \quad (4)$$

式中,  $s_i(t)$  和  $s_q(t)$  分别表示为同相信号和正交信号,  $\alpha$  为调制指数且  $\alpha \in [0, 1]$ ,  $f_c$  是副载波频率.为了避免信息损失和非线性,  $s_i(t)$  和  $s_q(t)$  必须满足不等式:  $s_i^2(t) + s_q^2(t) \leq 1$ .接收机接收的光强为

$$P(t) = PA(t) \{1 + \alpha [s_i(t) \cos 2\pi f_c t +$$

$$s_q(t) \sin 2\pi f_c t]\} \quad (5)$$

式中,  $A(t)$  是雾对光信号的透射率.经过光电探测器后,输出的电信号为

$$I(t) = A(t) + \alpha A(t) [s_i(t) \cos 2\pi f_c t + s_q(t) \sin 2\pi f_c t] + n_i(t) \cos 2\pi f_c t + n_q(t) \sin 2\pi f_c t \quad (6)$$

式中,  $n_i(t)$  和  $n_q(t)$  都是窄带高斯白噪声过程.

式(6)中的第一项可以通过接收机的带通滤波器滤除掉.把式(6)中的第二项转变为基带信号,这样就可以得到基带 PSK 同相信号

$$r_i(t) = \alpha A(u, t) s_i(t) + n_i(t) \quad (7)$$

和基带 PSK 正交信号

$$r_q(t) = \alpha A(u, t) s_q(t) + n_q(t) \quad (8)$$

## 3 信道编码

LDPC 码<sup>[9-10]</sup>是一种有稀疏校验矩阵的线性分组码,具有能够逼近香农极限的优良特性,其性能甚至可以超过 Turbo 码,并且由于采用稀疏校验矩阵,译码复杂度只与码长成线性关系,编解码复杂度适中,在长码长的情况下,仍然可以有效译码.目前该技术已得到国际上的广泛重视,今后将在通信中得到广泛应用,尤其是在质量较差的信道环境如移动通信、大气激光通信等领域.所以本文采用 LDPC 码作为信道编码.

LDPC 码的译码可以使用置信传播迭代译码算法,为此我们定义两个大小与奇偶校验矩阵相同的置信信息矩阵,一个是变量节点置信信息矩阵  $Q$ ,一个是校验节点置信信息矩阵  $R$ .置信传播译码算法的具体步骤为:

1) 初始化:从接收信号序列计算出对应每一个变量节点的置信信息  $L(c_n)$ ,同时对变量节点置信信息矩阵  $Q$  按照式(9)进行初始化.

$$Q_{j,n} = L(c_n) = \log \left( \frac{\Pr(c_n = 0 | y_n)}{\Pr(c_n = 1 | y_n)} \right) = 2y(n) / \sigma_n^2 \quad (9)$$

$$(j = 1, \dots, k)$$

式中,  $y(n)$  是经干扰后直接解调的信号,  $\sigma_n^2$  是高斯白噪声方差.

2) 校验节点置信信息矩阵  $R$  的更新:按照式(10)利用变量节点置信信息矩阵  $Q$  的内容对校验节点置信信息矩阵  $R$  进行更新.

$$R_{j,i} = 2 \tan h^{-1} \left[ \prod_{i' \in V_{j/i}} \tan h \left( \frac{Q_{j,i'}}{2} \right) \right] \quad (10)$$

3) 变量节点置信信息矩阵  $Q$  的更新:按照式(11)利用校验节点置信信息矩阵  $R$  的内容对变量节点置信信息矩阵  $Q$  进行更新.

$$Q_{j,n} = L(c_n) + \sum_{j' \in C_n \setminus j} R_{j',n} \quad (11)$$

4) 译码判决:对所有变量节点计算硬判决消息  $D_n = L(C_n) + \sum_{j \in c_n} R_{j,n}$ , 得到临时判决值  $\hat{c}_n$ , 并检验临时判决值是否满足校验矩阵的要求, 即是否满足等式  $\hat{c} H^T = 0$ . 如果满足则停止迭代, 返回有效的译码结果; 否则回到步骤 2) 继续迭代, 直到迭代次数超过规定的最大次数.

## 4 系统仿真

系统采用码长为 64800、码率为 1/2 的 LDPC 码作为信道编码, 这种 LDPC 具有极强的纠错能力, 并且已经被 DVB-S. 2 采用作为纠错编码. 副载波 BPSK 强度调制作为系统的调制方式. 大气信道的相关信息如表 1, 系统仿真模型如图 3.

表 1 大气通道信息

Atmospheric Channel	
Length	1 000 m
Visibility	100~1 000 m
Trans drop clear sky	5%
Fog model	Kim
Wavelength	1 550 nm
$\lambda_0$	550 nm

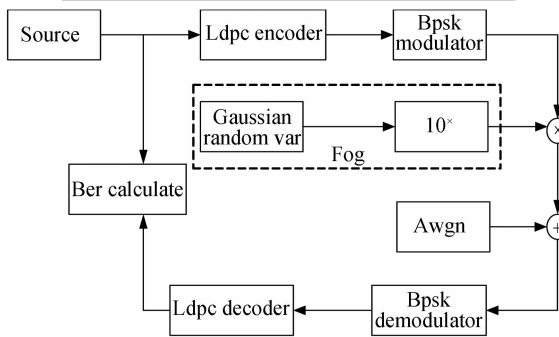


图 3 大气激光通信系统仿真模型

Fig. 3 Atmosphere laser communication system simulation model

图 4(a)和图 4(b)分别给出了 LDPC 编码的副载波 PSK 强度调制大气激光通信系统在轻雾和中等程度雾条件下误比特率与信噪比之间的性能曲线. 从图中可以清晰地看出, 由于采用了 LDPC 信道编码, 系统性能得到明显的改善, 大约至少可以获得 4 dB 的编码增益. 由于过大的译码次数会带来很大的延时, 所以把最大译码次数设为 10.

在浓雾天气条件下, 激光在大气信道中传输受到严重衰减, 使得光脉冲信号完全淹没在背景噪声中, 大气激光通信链路中断. 此时, 仅靠信道编码和增加光源的发射光功率(考虑人眼的安全, 光源的发射光功率不能过大)是不能克服浓雾对光通信链路的影响, 需要考虑采用其它通信方式作为大气激光通信的备份, 以提高系统的可靠性.

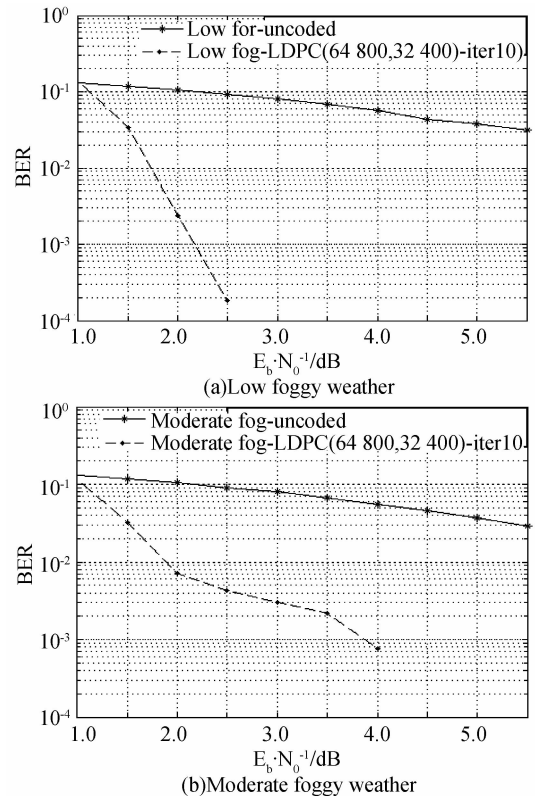


图 4 在轻雾和中等程度雾天气条件下 LDPC 编码的系统性能曲线

Fig. 4 LDPC coded system performance curve under low and moderate foggy weather conditions

## 5 结论

本文分析了雾产生的原因、相关数学模型及其对大气激光通信系统的影响. 在此基础上, 将 LDPC 码作为信道编码应用到大气激光通信系统中, 用来克服雾对系统性能的影响. 仿真结果表明 LDPC 码具有优越的纠错能力, 有效地克服了轻、中等程度雾对系统的影响.

### 参考文献

- [1] ARNON S, KEDAR D. Urban optical wireless communication networks: the main challenges and possible solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 42(2): 2-7.
- [2] FLECKER B, GEBHART M, SHEIKH MUHAMMAD S, et al. Results of attenuation measurements for optical wireless Channels under dense fog conditions regarding different wavelengths[C]. *SPIE*, 2006, 6303, 63030P1-11.
- [3] LEITGEB E, SHEIKH MUHAMMAD S, FLECKER B, et al. The influence of dense fog on optical wireless systems, analysed by measurements in Graz for improving the link reliability[C]. *IEEE*, 2006, 154-159.
- [4] XING Jian-bin, XU Guo-liang, ZHANG Xu-ping, et al. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1850-1852. 邢建斌, 许国良, 张旭苹, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响 [J]. *光子学报*, 2005, 34(12): 1850-1852.
- [5] MA Dong-tang, WEI Ji-bo, ZHUANG Zhao-wen. Performance

- evaluation and channel modeling of multiple beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020-1024.
- 马东堂,魏急波,庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1020-1024.
- [6] MUHAMMAD S S, KOHLDORFER P, LEITGEB, E. Channel modeling for terrestrial free space optical links. *Transparent Optical Networks*, 2005 [C]. Proceedings of 2005 7th International Conference. 2005, **1**: 407-410.
- [7] GEBHART M, LEITGEB E, SHEIKH MUHAMMAD S, *et al.* Measurement of light attenuation in dense fog conditions for FSO applications[C]. *SPIE*, 2005, **5891**: 1-12.
- [8] LU Q, LIU Q, MITCHELL G S. Performance analysis for optical wireless communication systems using sub-carrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric Channel [C]. *IEEE*, 2004, 1872-1875.
- [9] RICHARDSON T J, SHOKROLLAHI M A, URBANKE R L. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, **47**(2): 619-637.
- [10] BRINK S, KRAMER G, ASHIKHMIN A. Design of low-density parity-check codes for modulation and detection[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, **52**(4): 670-678.

## Influence of Fog on Atmospheric Laser Communication System and the Relevant Methods

WANG Yong, YU Lei, ZHANG Ya-bin, CAO Jia-nian

(College of Information & Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The causes of fog, the relevant mathematical models and its influence on atmospheric laser communication system are analyzed. In order to overcome the influence of fog on wireless optical communication link, the LDPC codes as channel coding are applied into atmospheric laser communication system, and it is simulated in the foggy atmospheric channel with combination of BP iterative decoding algorithm and sub-carrier PSK intensity modulation. The simulation results show that LDPC codes have excellent error correction capabilities and access to a larger coding gain, and the proposed scheme can satisfy the need of atmospheric laser communication system.

**Key words:** Atmospheric laser communication; Fog attenuation; Ldpc; Belief propagation iterative decoding algorithm



**WANG yong** was born in 1974. He is a lecturer at Harbin Engineering University. Now he is pursuing his Ph. D. degree, and his research interests focus on atmospheric laser communication and optical fiber communication.