

# 基于四进制频移键控调制的无线光通信同态滤波技术研究

陈丹 柯熙政 屈菲

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 基于无线光通信链路噪声特性,建立了大气信道等效数学模型。针对大气湍流引起的信号起伏,对通过大气信道的四进制频移键控(4FSK)已调信号采用了同态滤波技术去噪,同态系统中线性滤波器设计了零相位数字滤波器。当信源码字长度取 500 时,同态滤波去噪后的信号通过过零检测进行解调,在光强闪烁指数  $\sigma_s^2 = 0.1$ , 信噪比 10 dB 时,误码率达到  $7 \times 10^{-4}$ ,滤波效果明显优于传统数字滤波器。仿真结果表明,同态滤波能有效地滤除大气信道中的乘性噪声,能够有效地抑制大气湍流,提高光通信可靠性。

**关键词** 无线光通信;同态滤波;四进制频移键控;消噪

**中图分类号** TN929.1      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL201138.0205001

## Research on Homomorphism Filtering Technology of Wireless Optical Communication Based on Four Frequency Shift Keying Modulation

Chen Dan Ke Xizheng Qu Fei

(School of Automation & Information, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** Based on noise characteristics of wireless optical communication, atmospheric channel model was founded. Homomorphism filtering technology was applied to four frequency shift keying(4FSK) modulated signal denoising for atmospheric turbulence. Zero-phase digital filter in homomorphism system is desired. When the length of source code was 500 and the signal to noise ratio was 10 dB, the denoising 4FSK signal was demodulated by the zero crossing detection method, and the bit error rate arrived at  $7 \times 10^{-4}$  with turbulence parameter  $\sigma_s^2 = 0.1$ . The simulation results show that homomorphism filtering could reduce multiplicative noise more effectively than the traditional digital filter, and could control atmospheric turbulence to improve reliability of optical communication.

**Key words** wireless optical communication; homomorphism filtering; four frequency shift keying; noise reduction

**OCIS codes** 060.2605; 060.4080; 060.2630

### 1 引言

无线光通信采用大气信道作为传输媒介,信号的传输过程就是信号与大气信道的介质相互作用的过程。通信过程中不同的气象条件,如云、雾、雨等因素的影响,会引起系统中传输光脉冲质量降低<sup>[1,2]</sup>,大气信道中大气散射、折射及湍流效应也会

造成激光脉冲的衰减和展宽,从而导致接收信号中产生码间串扰和随机强度衰落噪声,致使通信系统误码率增加。

本文基于无线光通信链路中的噪声特性,把系统内电子噪声和背景光引起的噪声假设为加性的高斯分布<sup>[3,4]</sup>,大气湍流产生的接收光强闪烁看成大

**收稿日期**: 2010-06-21; **收到修改稿日期**: 2010-09-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977054)、国防重点实验室基金(9140C3601010701)和陕西省教育厅科学研究计划项目(08JK378)资助课题。

**作者简介**: 陈丹(1975—),女,博士研究生,讲师,主要从事大气激光通信及信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: chdh@xaut.edu.cn

**导师简介**: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信及信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

气通信系统的乘性噪声<sup>[5]</sup>,对大气信道进行了数学模型建立。基于前期研究四进制频移键控(4FSK)高斯信道下仿真及其误码率性能的分析<sup>[6]</sup>,对经过大气模拟信道后的染噪 4FSK,接收光信号采用了同态滤波去噪处理,处理后的 4FSK 信号再通过过零检测法进行解调,获得了降低误码率的良好效果。

## 2 大气传播信道及模型

对于大气无线光通信系统,其噪声主要包括了背景光噪声和接收机噪声以及大气湍流引起的大气闪烁。大气湍流是由于大气温度和大气压强的微小变化引起的大气折射率在时间和空间上随机起伏,主要体现在接收端光强闪烁。在直接探测强度调制系统中影响通信性能最主要的因素就是强度起伏即光强闪烁,很多科研人员针对湍流信道条件下光强闪烁的数学模型进行了研究,其中 Rytov 提出的弱湍流下光强的对数正态分布模型受到了学术界的普遍认可<sup>[7]</sup>,这里仅考虑大气弱湍流对光通信的影响。

弱湍流信道下,对于光强度调制(IM/DD)通信系统,接收光功率  $P(t)$  为

$$P(t) = X(t)P_s(t) + n(t), \quad (1)$$

式中  $P_s(t)$  为无湍流下的接收光功率,  $n(t)$  为高斯白噪声,  $X(t)$  为等可能概率过程引起的光强闪烁,其概率密度函数

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2 X}} \exp\left[-\frac{(\ln X + \sigma_s^2/2)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad (2)$$

式中平均闪烁指数  $X$  已经归一化,  $\sigma_s^2$  为  $X$  的对数方差,  $\sigma_s$  也称为光强闪烁指数。当  $\sigma_s^2 \ll 1$  时,  $\sigma_s^2 = \sigma_X^2 [\sigma_X^2 = \exp(\sigma_s^2) - 1 \approx \sigma_s^2]$ 。  $\sigma_s^2$  由大气状态及传输路径长度决定,数值越大表示闪烁越严重,一般  $\sigma_s^2 < (0.2 \sim 0.5)$ <sup>[8]</sup>。

假设系统接收机采用雪崩光电二极管(APD)

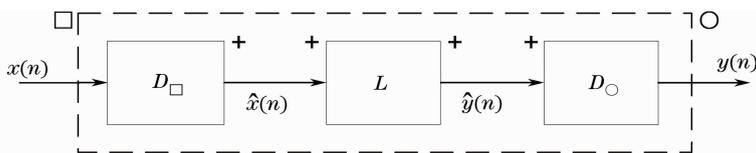


图 2 同态系统规范形式

Fig. 2 Canonical form of homomorphic system

在信号处理中,有的信号可以表示成两个或两个以上分量信号的乘积,想要分离各信号分量或单独地改变某一信号分量,用一个线性系统去作用可能完全无效<sup>[13]</sup>。但同态系统处理却可以取得较好的效果。考虑这样一类同态系统,它遵从输入运算

探测器,由 APD 接收机的暗电流和热噪声引起的接收机信号计数的波动可用一个高斯随机过程来模拟<sup>[9,10]</sup>,其中文献[9]详细分析了背景光计数的概率密度函数。综上所述,对于大气无线光通信系统,考虑的系统噪声主要包括背景光噪声,APD 噪声等加性噪声以及基于对数正态分布的乘性噪声大气闪烁,因此,大气信道等效的数学模型框图<sup>[11,12]</sup>如图 1 所示。

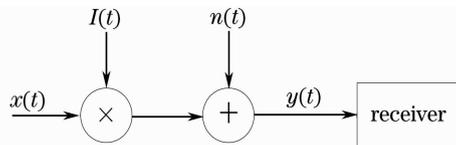


图 1 大气信道等效数学模型框图

Fig. 1 Atmospheric channel equivalent mathematics model

图 1 中  $x(t)$  表示发射信号,  $y(t)$  为接收机接收信号,  $I(t)$  和  $n(t)$  分别为大气信道的乘性和加性噪声。加性噪声独立于发送光信号,而乘性噪声大气闪烁并不独立于发送光信号,它和信号的有无及大小有关,当发送“0”比特信号光时,噪声干扰也就不存在了,而且随着对数振幅起伏均方差的增大,通信链路中传输比特的错误概率增加,通信性能进一步恶化。由图 1 可知,  $y(t) = I(t) \cdot x(t) + n(t)$ ,其中乘性噪声  $I(t)$  是信道状态信息,表征为大气湍流强度,弱湍流情况下服从对数正态分布,其均值为  $\exp(-2\sigma_s^2)$ ,方差为  $2\sigma_s^2$ 。加性噪声  $n(t)$  满足均值为 0,方差为  $\sigma^2$  的高斯分布随机变量。

## 3 同态滤波

### 3.1 解相乘同态技术

服从于关于输入运算“□”和输出运算“○”的广义叠加原理的系统称为同态系统。同态系统可以表示成如图 2 所示的 3 个系统级联。

“□”为相乘、“○”为取幂的广义叠加原理,设要讨论的输入信号一般形式:  $x(n) = [x_1(n)]^\alpha \cdot [x_2(n)]^\beta$ , 则相乘信号的特征系统应具有特性

$$D_\square \{ [x_1(n)]^\alpha \cdot [x_2(n)]^\beta \} = \alpha D_\square [x_1(n)] + \beta D_\square [x_2(n)], \quad (3)$$

对数函数就是形式上具有这种性质的函数。例如，若  $x(n) = x_1(n) \cdot x_2(n)$ ，且对于所有的  $n$ ， $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  均大于 0，则  $\ln\{[x_1(n)]^\alpha \cdot [x_2(n)]^\beta\} = \alpha \ln[x_1(n)] + \beta \ln[x_2(n)]$ 。应用乘法同态系统理论时，必须恰当地选择线性系统  $L$ 。如何选择要视输入的信号而定，能否有效地处理形如  $x(n) = x_1(n) \cdot x_2(n)$  的信号，与特征系统输出分量  $\hat{x}_1(n)$  和  $\hat{x}_2(n)$  的性质有关。

这里 4FSK 信号为双极性过零信号，对染上乘性噪声的 4FSK 信号进行同态滤波时，将待处理信号映射转化为恒大于零的单极性信号后进行对数处理，避免了对零和负数取对数的困难，再采用线性滤波滤除干扰信号，将滤净的信号进行取指数处理，恢复原状态调制信号<sup>[14]</sup>，最后进行解调。

### 3.2 线性滤波器设计

对 4FSK 调制解调进行了系统仿真，只考虑大气湍流对该无线光通信系统的影响，大气湍流产生的接收光强闪烁看成大气通信系统的乘性噪声。对

染上乘性噪声的 4FSK 已调信号消噪后采用过零检测法进行解调，必须对同态滤波系统的线性滤波器相位失真要求严格。这里选用零相位数字滤波器，如图 3 所示。它先将输入序列按顺序滤波，然后将所得结果逆转后反向通过滤波器，再将所得结果逆转后输出，即得精确零相位失真的输出序列<sup>[15]</sup>。

零相位数字滤波的时域表示为

$$y_1(n) = x(n) * h(n), \tag{4}$$

$$y_2(n) = y_1(N - 1 - n), \tag{5}$$

$$y_3(n) = y_2(n) * h(n), \tag{6}$$

$$y(n) = y_3(N - 1 - n), \tag{7}$$

式中  $x(n)$  表示输入序列， $h(n)$  为所用数字滤波器单位序列响应， $*$  表示卷积， $y_1(n)$  为输入序列经过滤波器  $h(n)$  后的输出序列， $y_2(n)$  为  $y_1(n)$  的反转序列， $y_3(n)$  为  $y_2(n)$  第二次经过滤波器  $h(n)$  后的输出， $y(n)$  为第二次滤波结果的反转序列，也即零相位数字滤波输出序列。

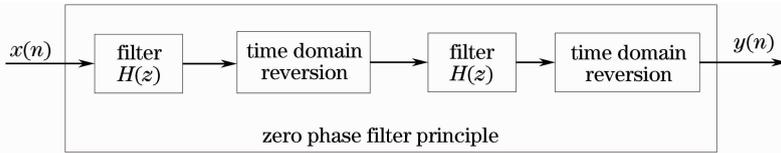


图 3 零相位滤波器结构图

Fig. 3 Structure graph of zero phase filter

## 4 4FSK 调制与解调

4FSK 调制与解调系统如图 4 所示。

时频调制实际上是用编码方法来传输信息，由于时频编码调制的抗衰落和抗码间串扰能力较强，因此在时频编码调制基础上进行 4FSK 的传输。在调制系统中，4FSK 编码采用四进制四时四频制来传输 2 个二进制符号，即用 4 个调制频率的组合来

传送二进制数据流。把一个码元分成 4 个时隙，在不同的时隙内发送不同的频率，故在 4 个时隙中发送 4 个不同的频率。由于正交码的抗干扰能力比较强，所以，优先选择正交码，其选择的原则是尽可能使码距大一些。设 4 个不同调制频率为  $F_1, F_2, F_3, F_4$ ，采用这 4 个频率的不同组合方式来代表不同的码元，有

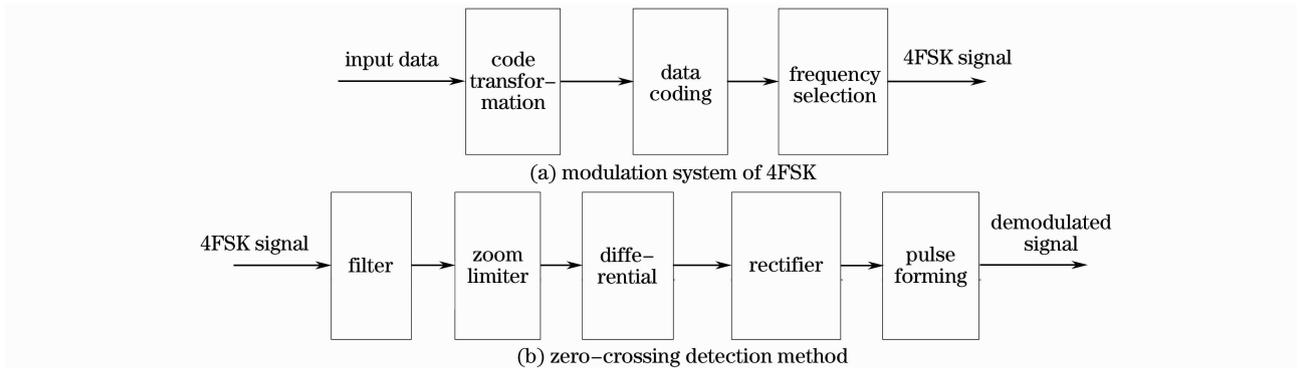


图 4 4FSK 调制解调系统框图

Fig. 4 Modulation and demodulation system of 4FSK

00— $F_1 F_2 F_3 F_4$       01— $F_2 F_3 F_4 F_1$

10— $F_3 F_4 F_1 F_2$       11— $F_4 F_1 F_2 F_3$

数字频率键控(FSK)信号常用的解调方法有很多种,如相干(同步)解调法、包络解调法、过零检测法等。采用过零检测法对接收到的消噪后 4FSK 调制信号进行解调,4FSK 信号的过零点随不同载频而不同,当频率大时,过零点的次数多,当频率小时,过零点的次数少,故通过判断过零点个数的多少可得到关于频率的差异。

### 5 同态滤波消噪仿真

设信源是随机发生器产生的长度为 30 的码元,对其进行 4FSK 调制,4 个载波频率分别为  $f_1 = 2 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_4 = 8 \text{ Hz}$ ,将已调 4FSK 信号通过大气信道,大气信道对数振幅方差  $\sigma_s^2 = 0.2$ ,信噪比(SNR)为 5 dB,采用同态滤波进行消噪

处理,最后对消噪后 4FSK 信号进行过零检测解调,与原码字进行比较,计算出的错误码字个数为 0。仿真结果如图 5 所示。

信源码经过 4FSK 调制后的波形图见图 5(a),经过模拟的大气信道传输后信号波形见图 5(b)。对经过大气模拟信道后的调制信号进行同态滤波,得到如图 5(f)所示的滤除噪声后的调制信号,采用过零检测法对该信号进行 4FSK 解调,将图 5 中(a)与(f)进行对比,得到在不同载频处信号过零点数目一致,因而经过同态滤波消噪后的调制信号解调所得到的码元与原信息码元一致。

为了从统计特性来研究不同信噪比以及不同大气光强闪烁指数下同态滤波系统的误码性能,对载波  $f_1 = 200 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 400 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 600 \text{ Hz}$ ,  $f_4 = 800 \text{ Hz}$ 的信号采用 Monte Carlo 方法对系统误码性能进行了仿真,其中信源是随机产生长度为 500 的

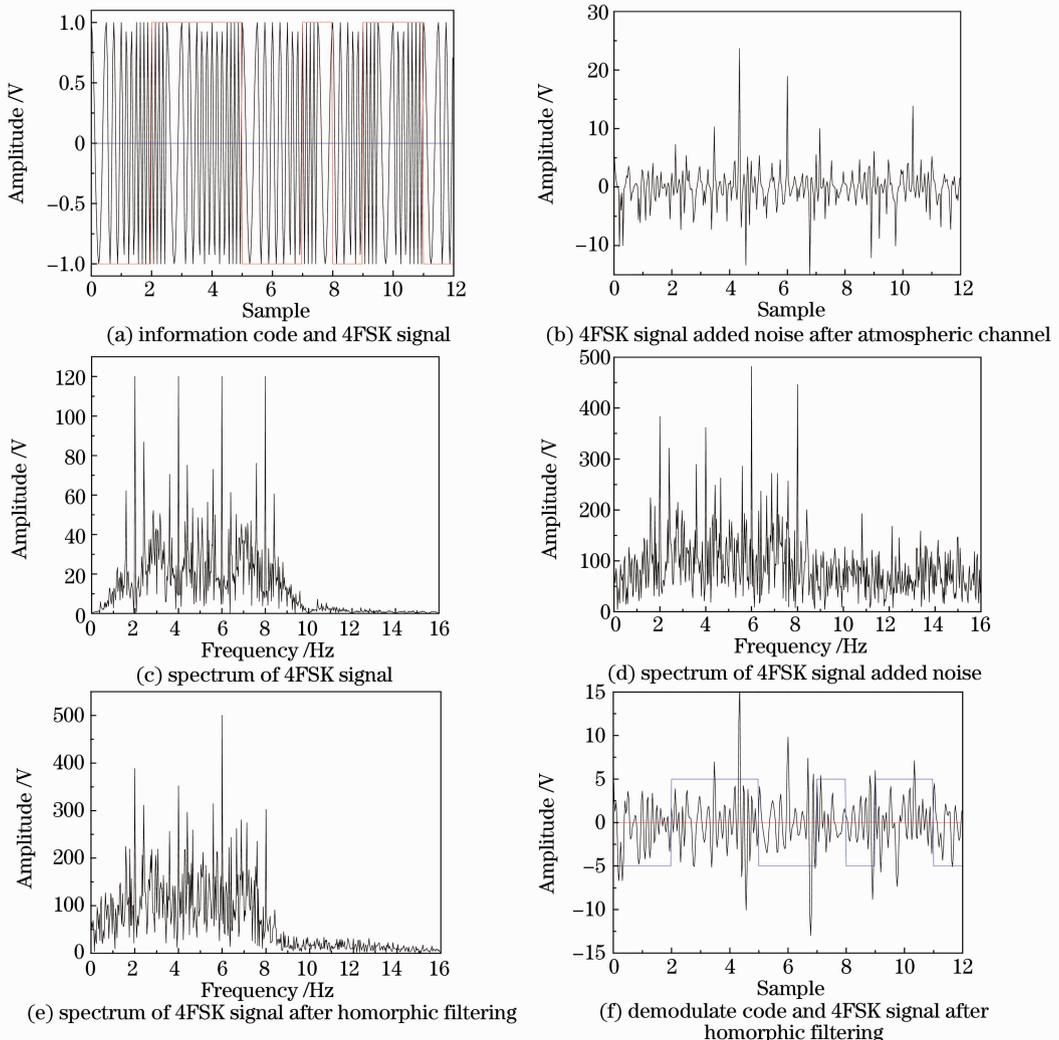


图 5 同态滤波前后信号波形及频谱图

Fig. 5 Singal wave and spectrum graph before and after homorphic filter

码元。仿真结果如图6所示。从图中可得出随着 $\sigma_s^2$ 的增大,大气信道引入的乘性噪声加大,系统误码率有所提高。当 $\sigma_s^2=0.2$ 时,采用同态滤波消噪系统在信噪比为10 dB时,误码率(BER)为 $5 \times 10^{-3}$ ,而 $\sigma_s^2=0.1$ 时BER达到 $7 \times 10^{-4}$ 。仿真中,噪声滤除采用同态滤波技术外,还采用了传统远红外(FIR)巴特沃斯数字滤波进行解调前信号消噪处理,相同信噪比(10 dB)下解调后信号的误码率达到 $10^{-2}$ ( $\sigma_s^2=0.1$ ),明显大于同态滤波系统所得解调信号误码率,说明了传统的数字滤波仅对加性噪声的滤除具有优势,而同态滤波可以有效地消除无线通信信道中的乘性干扰。

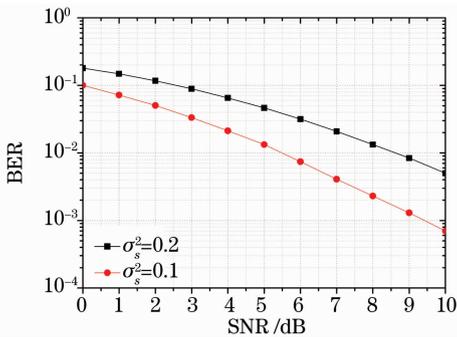


图6 不同 $\sigma_s^2$ 下同态滤波系统的误码率

Fig. 6 BER performance of homomorphic filter system under different  $\sigma_s^2$

## 6 结 论

分析了影响光传输大气无线信道的主要因素,基于大气无线光通信信道的数学模型对经过信道后染上乘性噪声的4FSK已调信号选取同态滤波技术去噪,其中同态系统中线性滤波器的设计采用了零相位数字滤波器,最后基于过零检测的解调方法获取接收端码字。通过对随机产生的传输码流大气无线信道传输仿真,可以看出系统误码率随着大气光强闪烁指数的增大有所升高,基于同态滤波技术的无线光通信系统能够在较低信噪比条件下获得较低的误码率。仿真结果证明了同态滤波对消除无线光信道中的乘性噪声具有一定的优势,能够有效地抑制大气湍流效应,提高通信系统的可靠性。

## 参 考 文 献

1 G. Prati, R. M. Gagliardi. Decoding with stretched pulses in

- laser PPM communications[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2004, **31**(9): 1037~1045
- 2 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. 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. 大气激光通信中的多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- 3 Li Yuquan, Zhu Yong, Wang Jiangping. Optical Communication Principle and Technology[M]. Beijing: Science Press, 2006  
李玉权, 朱勇, 王江平. 光通信原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- 4 T. Ohtsuki, H. Yamaguchi, R. Matsuo *et al.*. Equalization for infrared wireless systems using OOK CDMA[J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2002, **E85-B**(10): 2292~2299
- 5 He Xiaomei, Li Xiaofeng, Che Yaliang. Research on influence of atmospheric turbulence on near ground wireless optical communication links[J]. *Infrared*, 2007, **10**(28): 26~29  
何小梅, 李晓峰, 车雅良. 大气湍流对近地无线光通信链路影响的研究[J]. *红外*, 2007, **10**(28): 26~29
- 6 Ke Xizheng, Chen Dan, Qu Fei. The simulation of 4FSK and the performance analyse of error rate in the RoFSO system[J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(4): 466~469  
柯熙政, 陈丹, 屈菲. RoFSO系统中4FSK仿真及其误码率性能分析[J]. *激光技术*, 2010, **34**(4): 466~469
- 7 Xie Weiliang, Tang Junxiang. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on Turbo code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 835~838  
谢伟良, 汤俊雄. 基于Turbo码的大气无线光通信系统特性分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 835~838
- 8 M. Hata, N. Morinaga, T. Namekawa. Receiver performance of optical analog communication systems through the atmosphere[J]. *IEICE Trans. Commun.*, 1983, **66**(1): 79~83
- 9 X. Sun, F. M. Davidson, L. Boutsikaris. Receiver characteristics of laser altimeters with avalanche photodiodes[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **28**(1): 268~275
- 10 R. M. Gagliardi, S. Karp. Optical Telecommunications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998
- 11 Xiaoming Zhu, J. M. Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2002, **50**(8): 1293~1300
- 12 Liang Jixiong. Study of LDPC Code in of Atmospheric Wireless Optical Communication under Weak Turbulence[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004. 69~70  
梁吉雄. 弱湍流情况下大气无线光通信LDPC码研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004. 69~70
- 13 Wu Zhaoxiang. Digital Signal Processing (volume II) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995  
吴兆熊. 数字信号处理(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 14 Zhang Chunzhen. Zero passage signal homomorphic treating method and shortwave anti-fading receiving homomorphic treating method; China, 89107809. 6[P]. 1993-04-02  
张存楨. 过零信号同态处理方法及短波抗衰落接收同态处理方法; 中国, 89107809. 6[P]. 1993-04-02
- 15 Ji Yuebo, Qin Shuren, Tang Baoping. Zero phase digital filter[J]. *Journal of Chongqing University*, 2000, **23**(6): 4~7  
纪跃波, 秦树人, 汤宝平. 零相位数字滤波器[J]. *重庆大学学报*, 2000, **23**(6): 4~7