

文章编号: 0258-7025(2004)04-0465-04

# 基于小波变换的雪崩光电二极管 信号检测方法

华卫令<sup>1</sup>, 马东堂<sup>2</sup>, 魏急波<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江省医药高等专科学校基础部, 浙江 宁波 315100; <sup>2</sup> 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 空间激光通信中的常用调制方式是脉冲位置调制(PPM),雪崩光电二极管(APD)具有高增益、高灵敏度和响应速度快的特点,因而成为空间激光通信中的首选信号探测器件。针对空间激光通信的脉冲位置调制信道,分析了空间光通信系统中雪崩光电二极管探测噪声的特点和类别,根据小波变换具有提取信号局部特征的能力,提出了一种基于小波变换的雪崩光电二极管信号检测方法。采用四种不同的阈值选择算法选取小波系数以恢复信号,并进行了初步的仿真实验和分析。结果表明,自适应阈值选择算法取得的信号恢复结果最佳,可有效减弱背景噪声的影响,提高雪崩光电二极管信号检测系统的性能。

**关键词** 信号检测;空间激光通信;脉冲位置调制信道;雪崩光电二极管探测器;探测噪声;小波变换

**中图分类号** TN 929.1 **文献标识码** A

## APD Signal Detecting Method Based on Wavelet Transform

HUA Wei-ling<sup>1</sup>, MA Dong-tang<sup>2</sup>, WEI Ji-bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Foundation Department, Zhejiang Pharmaceutical College, Ningbo, Zhejiang 315100, China  
<sup>2</sup>School of Electronic Science and Engineering, National University of  
Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Pulse position modulation (PPM) is the most often used modulation technique in space laser communications. As avalanche photodiode detector (APD) has high gain, high sensitivity and fast response, it is a likely candidate to detect laser signals for providing space laser communications needs. This paper discusses the characteristics and sorts of noises in the APD signal detecting subsystem, as the PPM channel is considered in the space laser communication system. Based on the ability of achieving topical characteristics of signals by the wavelet transform, a method of APD signal detecting based on the wavelet analysis is proposed. Four different threshold limit-selecting methods are applied to choose the wavelet coefficient for signal-recovering. A primary simulation experiment and some analyses are also done. The results show that the adaptive threshold values selecting algorithm is the best one. It can mitigate the effect of the intensive background noise to improve the performance of the APD signal detecting system.

**Key words** signal detect; space laser communication; pulse position modulation channel; avalanche photodiode detector; detection noise; wavelet transform

## 1 引 言

接收机信号检测技术是空间激光通信中的关键技术之一。研究表明<sup>[1]</sup>,为了在空间信道中实现有效传输,系统需要采用高功率的激光发射机。脉冲

位置调制(PPM)有着非常好的平均功率效率,目前的空间激光通信系统大多采用脉冲位置调制激光发射机。对应脉冲位置调制激光发射机,需要开发与其相适应的高性能脉冲位置调制接收机。

收稿日期:2002-12-11;收到修改稿日期:2003-01-27

作者简介:华卫令(1969—),女,浙江宁波人,浙江省医药高等专科学校讲师,在职硕士研究生,主要从事小波理论和应用、医学中的数学基础等方面的研究。E-mail:herry\_ma@hotmail.com

雪崩光电二极管 (APD) 具有增益高 (固有增益可达 10~1000 dB)、灵敏度高、响应速度快的特点, 因而可用于检测高速调制的脉冲位置调制光信号。在脉冲位置调制接收机中, 雪崩光电二极管探测器起着前端光电转换器的作用, 其作用在整个光通信系统中都是举足轻重的。但是雪崩光电二极管探测器存在一个问题, 即线性动态范围小, 难以控制其最佳工作状态。脉冲位置调制接收机接收的光信号衰减和畸变严重, 强度分布的时间和空间随机性强, 信噪比低。

统计检测理论分析表明, 已知信号波形时, 最佳检测器是匹配滤波器 (Matched Filter), 而当信号波形未知时, 则通常采用广义似然比检测 (GLRT), 即先对未知信号进行最大似然估计, 并把这个估计当作真值, 再进行似然比检验。如果能够有效地利用关于信号的某些先验知识, 就可以提高检测器性能。利用小波变换, 可以提取信号的波形信息, 因此可以在较低信噪比情况下检测到暂态信号。本文拟将小波变换理论应用到雪崩光电二极管信号探测和处理中去, 进行了初步的尝试和分析。

## 2 脉冲位置调制信道中的雪崩光电二极管探测

强度调制/直接探测的信道模型通常是多径失真引起的强度调制限制与加性高斯白噪声 (AWGN) 的结合<sup>[2]</sup>。

令  $x(t)$  表示脉冲位置调制发射机  $t$  时刻的瞬时光功率, 则

$$x(t) \geq 0, \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \leq P_t \quad (1)$$

式中,  $P_t$  为发射机平均功率的极限值。一种典型的二进制脉冲位置调制调制雪崩光电二极管探测系统模型如图 1 所示。

雪崩光电二极管信号检测的噪声类型主要有背景辐射噪声和探测器噪声两类。背景辐射源可以分

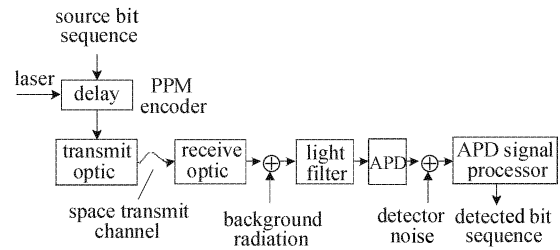


图 1 脉冲位置调制调制雪崩光电二极管探测系统模型

Fig. 1 APD detecting system model with PPM modulation

成两种基本形式: 1) 存在于任何一种天线视场中的漫射天空背景辐射; 2) 不连续光源即点源, 如星体、行星、太阳和其他类似物, 它们比较局部化但强度比较高, 既可以在视场内, 又可以在视场外。背景辐射决定了信道的动态时变特性, 表现为接收光功率的随机起伏, 一般采用高性能的滤光器加以抑制。深空中, 背景辐射噪声的影响严重, 一般采用原子滤光器。探测器噪声分为散弹噪声、电路噪声 (热噪声) 和光电倍增噪声。散弹噪声计数过程由强度计数过程支配<sup>[3]</sup>, 接收机工作在散弹噪声极限条件下可以有效地改善接收机输出的瞬时信噪比 SNR<sup>[3]</sup>, 此时电路噪声可以忽略。为了达到这一条件, 接收机接收的平均信号功率必须适当地超过电路噪声电平。而满足这一点非常困难, 目前实现散弹噪声极限条件的有效方案是采用高增益的光电倍增器件。

文献[1]中给出了脉冲位置调制信道雪崩光电二极管光电探测输出信号的模型, 当光强为  $\lambda(t)$  时,  $T_s$  时间内雪崩光电二极管吸收的平均光子数为

$$\bar{n} = \frac{\eta}{h\nu} \int_0^{T_s} \lambda(t) dt$$

其中,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为激光频率,  $\eta$  为探测器的量子效率, 即入射光子的吸收率。实际吸收的光子数服从泊松分布。给定平均吸收光子数条件下雪崩光电二极管产生的电子数  $m$  的条件概率分布来自 McIntyre-Conradi 分布<sup>[1]</sup>, 后来形成了如下的连续 Webb 分布函数<sup>[1]</sup>近似

$$p(m | \bar{n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{n}GF}} \cdot \left[ 1 + \frac{m - G\bar{n}}{\bar{n}GF/(F-1)} \right]^{-3/2} \cdot \exp \left\{ - (m - G\bar{n})^2 \cdot \left[ 2\bar{n}GF \left[ 1 + \frac{m - G\bar{n}}{\bar{n}GF/(F-1)} \right] \right]^{-1} \right\} \quad (2)$$

其中,  $F = \kappa G + (2 - 1/G)(1 - \kappa)$ ,  $G$  为雪崩光电二极管的平均增益,  $\kappa$  为雪崩电离系数,  $F$  为附加在雪崩光电二极管上的噪声因子。附加到雪崩光电二极

管输出端上的噪声服从独立的高斯分布<sup>[1]</sup>, 所以每个脉冲位置调制时隙上探测器信号的统计概率密度服从 Webb-Gaussian 分布

$$p(x | \bar{n}) = \sum_{m=0}^{\infty} \phi(x, \mu_m, \sigma^2) p(m | \bar{n}) \quad (3)$$

其中,  $\phi(x, \mu_m, \sigma^2)$  是均值为  $\mu_m = mq + I_s T_s$ , 方差为  $\sigma^2 = [2qI_s + (4kT/R)BT_s^2]$  的高斯概率密度函数<sup>[1]</sup>。 $q$  为电子电量,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为等效噪声温度,  $I_s$  为雪崩光电二极管表面漏电流,  $B$  为单边噪声带宽。雪崩光电二极管表面漏电流不被雪崩光电二极管倍增, 被看作直流常量。相反暗电流  $I_b$  会被雪崩光电二极管放大, 被视为背景辐射的一部分。正如文献<sup>[1]</sup>所述, (3) 式的近似并没有取得预想的精确近似结果。

综合上述分析, 脉冲位置调制信道中雪崩光电二极管探测器的输出信号(含噪声)近似为 Webb-Gaussian 分布, 不具有周期性。当雪崩光电二极管平均增益  $G$  较大时, 在信号平均功率点(信号判决点)附近, 噪声趋于加性高斯白噪声, 具有平稳性。而且, 无法精确描述雪崩光电二极管探测器输出信号的波形和到达时间。现在的关键问题是: 如何设计图 1 中的光电检测处理器, 以从雪崩光电二极管输出的低信噪比、非平稳信号中恢复出原始信号?

### 3 基于小波变换的雪崩光电二极管信号检测处理器

假定连续信号  $f(x)$  是一个平方可积函数, 则它的小波变换为

$$Wf(s, x) = Wf_s(x) = f * \varphi_s(x) = \frac{1}{s} \int_{\frac{x}{s}} f(t) \varphi\left(\frac{x-t}{s}\right) dt \quad (4)$$

其中  $W$  为二进小波变换算子,  $s$  为尺度因子,  $\varphi_s(x) = \frac{1}{s} \varphi\left(\frac{x}{s}\right)$ 。可以把小波变换看作输入  $f$  时系统  $\varphi_s(x)$  的响应, 而  $\varphi_s(x)$  为系统的冲击响应函数。

在大多数情况下, 小波模型不要求使用连续的尺度  $s$ , 为使小波变换能够快速实现数字化, 假定尺度因子  $s = 2^j (j \in Z)$ , 这样就形成了二进小波变换。

此时,  $\varphi_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j} \varphi\left(\frac{x}{2^j}\right)$ , 则  $f(x)$  在尺度  $2^j$  和位置  $x$  的二进小波变换<sup>[4]</sup> 可定义为

$$W_{2^j} f(x) = f * \varphi_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j} \int_{\frac{x}{2^j}} f(t) \varphi\left(\frac{x-t}{2^j}\right) dt \quad (5)$$

为了保持小波变换的完备性和稳定性, 假定存在两个严格的正常数  $A$  和  $B$ , 使得小波  $\varphi(x)$  对于任意的  $\omega \in R$  满足  $A \leq \sum_{j=-\infty}^{+\infty} |\hat{\varphi}(2^j \omega)|^2 \leq B$ 。其中,  $\hat{\varphi}(2^j \omega)$

是  $\varphi_{2^j}(x)$  的傅里叶变换。令函数  $\chi(x)$  的傅里叶变换满足  $\sum_{j=-\infty}^{+\infty} \hat{\varphi}(2^j \omega) \hat{\chi}(2^j \omega) = 1$ , 则  $f(x)$  就可以从它的二进小波变换中恢复

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} W_{2^j} f(x) * \chi_{2^j}(x) \quad (6)$$

满足上述条件的  $\chi(x)$  有无穷多个, 取其中一种可能  $\hat{\chi}(\omega) = \hat{\varphi}(\omega) / \sum_{j=-\infty}^{+\infty} |\hat{\varphi}(2^j \omega)|^2$ , 由帕斯瓦尔定理可得:  $A \|f\|^2 \leq \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \|W_{2^j} f(x)\|^2 \leq B \|f\|^2$ 。这说明二进小波既是完备的, 又是稳定的。对  $x$  进行离散化, 将  $f(x)$  用  $W_{2^j} f(x)$  在每个尺度  $s = 2^j (j \in Z)$  上以间隔  $a2^j$  ( $a$  取足够小) 均匀采样来表征。

分析式(1), (3)可以发现, 雪崩光电二极管探测器的输出信号恰好是适于小波变换处理的低信噪比、短时、非平稳、到达时间和波形未知的信号。基于小波变换的信号检测器适用于图 1 中的光电检测处理器。

基于小波变换的信号检测处理器离散化模型可以简化为

$$\left. \begin{aligned} H_0: & y = n \\ H_1: & y = f + n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中,  $y$  为雪崩光电二极管探测器输出并经电路滤波处理后的信号  $M$  维向量,  $f$  为待检测信号  $M$  维向量,  $n$  为零均值的加性高斯白噪声  $M$  维向量, 其协方差阵为  $\Lambda$ 。小波变换可以看成是将信号向量乘一个各行是小波变换算子的采样值的变换矩阵  $R$  得到小波系数  $\{C(m, n), M_1 \leq m \leq M_2, 0 \leq n \leq N-1\}$ 。为了方便, 用  $y, f, n$  等表示这些系数组成的向量。对  $H_0$  和  $H_1$  下的  $y$  进行分析处理<sup>[4]</sup>, 即可得到小波检测的似然比函数。然后, 确定判决门限(阈值可变), 去掉低于阈值的小波系数就相当于除去了部分噪声信号, 然后利用剩下的小波系数估值, 进行小波反演重建得到信号  $f(x)$  的估值。

与其他检测器进行性能比较, 可以发现: 基于小波变换的检测器的性能大大好于能量检测器, 而与匹配滤波器相差不远。基于小波变换的检测器利用单边指数小波, 并通过调整小波的尺度和时移因子, 小波变换系数较好地反映了信号的特征, 从而能在较低信噪比下正确检测到信号和估计到达时间。

从上述分析可以看出, 小波变换是一种多分辨率分析。当  $2^j$  较小时, 时间分辨率高, 适合于分析高频信号, 可以深入观察过程的细节, 更加精确估计信号出现时间; 当  $2^j$  较大时, 频率分辨率较高, 适合于分析低频信号, 可以看到过程全貌, 从而使基于小

波变换的检测器具有较好的鲁棒性。

#### 4 仿真实验与结果分析

采用式(7)作为信号检测模型,用 Matlab6.1 软件的 Wavelet Toolbox 对一组含噪信号进行了计算机实验。首先,对一组信噪比为 0.8 的一维模拟产生的脉冲位置调制信道雪崩光电二极管输出的数据信号(采样点为 1024 个)进行二进小波变换,继而采用 4 种不同的阈值选择算法进行阈值操作,然后再由二进小波反变换重建原信号,得到了图 2 中的实验结果。

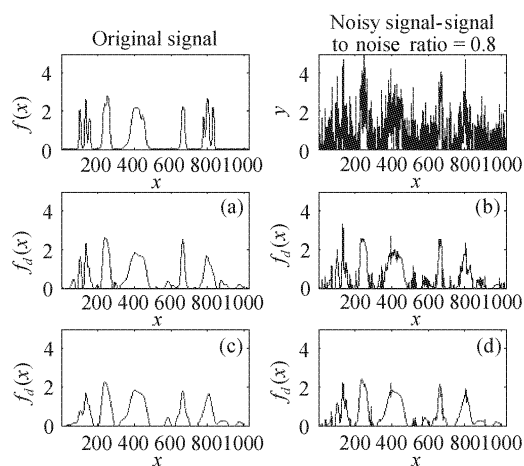


图 2 不同阈值选择算法选取小波系数  
恢复信号的仿真

Fig. 2 Simulation of resuming signal according to wavelet transform coefficient with various threshold selecting arithmetic

图 2(a)综合使用了固定形式阈值和自适应阈值。阈值表达式为

$$\begin{cases} \sigma \cdot \sqrt{2\lg(n)/n} & \|y\| > \sigma \\ \sigma \cdot \sqrt{2\lg(n)/s} & \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $n = 1024$  为采样点个数,  $\sigma$  为最小二乘估计(无偏风险估计)得到的噪声信号强度。

图 2(b)使用基于无偏风险估计的自适应阈值选择算法,阈值取为  $\sigma \cdot \sqrt{2\lg(n)/s}$ 。

图 2(c)使用固定形式的阈值选择算法,阈值取为  $\sigma \cdot \sqrt{2\lg(n)/n}$ 。

图 2(d)使用极大极小准则选择阈值,根据极大极小化准则,对小波系数进行处理得到小波系数处理的阈值<sup>[5]</sup>。

图中的横坐标  $x$  表示取样点,  $f(x)$  表示原始信号值,  $y$  为含有噪声的信号值,即  $f(x)$  经过脉冲位置调制信道和雪崩光电二极管探测器后输出的电信号,  $f_d(x)$  为重建后的信号值。比较图 2 4 种情况下的  $f_d(x)$  和  $f(x)$  可以发现, (a) 和 (b) 两种情况下重建的信号较好, 尤其 (b) 中的信号接近于原始信号。可见, 自适应阈值选择算法应用于基于小波变换的雪崩光电二极管信号检测中可取得较好的信号恢复结果。

由脉冲位置调制演变来的调制方法微分 PPM (DPPM), 多脉冲 PPM (MPPM)<sup>[2]</sup>, 联合 PPM (CPPM) 和并行 PPM (OPPM) 等具有比脉冲位置调制更优的性能, 使用本文介绍的信号检测方法可望取得较好的效果。

初步的分析和仿真表明, 这种检测方法应用于检测脉冲位置调制信道得到的低信噪比信号, 可以有效去除强背景噪声, 降低噪声影响, 提高检测性能。

#### 参 考 文 献

- 1 M. Srinivasan, J. Hamkins, B. Madden-Woods *et al.*. Laboratory characterization of silicon avalanche photodiodes (APDs) for pulse-position modulation (PPM) detection [R]. *IPN Progress Report*, 42-146, 2001. 3~5
- 2 Da-shan Shiu, Joseph M. Kahn. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1999, 47(8):1201~1210
- 3 Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. *Optical Communications* [M]. New York, A Wiley Inter-science Publication John Wiley & Sons, 1976. 167~180
- 4 Xu Peixia, Sun Gongxian. *Wavelet Analysis and Application Examples* [M]. Hefei: Publication of Chinese Science and Technology University, 1996. 21~24  
徐佩霞, 孙功宪 编著. 小波分析与应用实例 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996. 21~24
- 5 David L. Donoho. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3):613~627