光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240923001

基于合成成形的光电子脉冲幅值提取方法研究

李成伟[1,2]，韩振伟[1*]，宋克非[1]，何玲平[1]，陶　琛[1]

（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，长春 130000；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 针对微通道板光子计数成像探测器输出光电子脉冲幅值提取精度不足的问题，文章系统研究了合成成形法参数与脉冲信号幅值精度的相关性。基于反褶积技术和冲激响应不变法原理，提出一种适用于光电子脉冲信号的准高斯合成成形方法。仿真结果表明，当输入信号白噪声标准差为0.1时，随着成形宽度参数的增加，提取幅值的标准差降低至0.02，证实该方法有效提高了脉冲幅值测量精度。通过建立脉冲识别阈值与漏记率、误判率之间的关系模型，对探测器测量光电子脉冲进行幅值提取比对。实验结果表明，相较于Sallen-Key成形法和直接幅值提取法，合成成形法的测量结果与真实幅值分布的吻合度更高。该方法为实现更高分辨率的光子计数成像应用提供了一种新技术路径。

关键词： 合成成形法；光电子脉冲信号；反褶积；K-S检验；脉冲堆积

中图分类号： TN247　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0149－08

Amplitude Extraction Method for Optoelectronic Pulses Based on Synthesis Shaping

LI Chengwei[1,2], HAN Zhenwei[1], SONG Kefei[1], HE Lingping[1], TAO Chen[1]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: To address the issue of accurately extracting the amplitude of photoelectron pulses outputted by microchannel plate-based photon-counting imaging detectors, this study investigates the correlation between the synthesis-shaping method parameters and the amplitude accuracy of pulse signals. A quasi-Gaussian synthesis-shaping approach tailored for photoelectron pulse signals is implemented using deconvolution techniques and impulse response invariance methods. The simulation results demonstrate that under a white noise standard deviation of 0.1 in the input signal, the standard deviation of the extracted amplitude converges to 0.02 as the shaping width increases, thereby enhancing the accuracy of pulse amplitude extraction. Furthermore, based on an analysis of the relationship between the pulse recognition threshold, pulse miss rate, and false recognition rate, a comparative analysis of amplitude was conducted on authentic photoelectron pulses outputted by the detector. The synthetic shaping method is closer to the real amplitude distribution than the Sallen-Key shaping method and direct amplitude extraction. This is a novel approach for high-resolution photon counting imaging applications.

Key words: synthesis shaping method; optoelectronic pulse signal; deconvolution; Kolmogorov-Smirnov test; pulse pileup

收稿日期：2024－09－23.

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFF0708500).

*通信作者：韩振伟

0 引言

基于微通道板的光子计数成像探测技术，在多个环境监测领域展现出不可或缺的作用，不仅广泛应用于太阳活动动态监测、空间环境微变捕捉，还可实现大气成分演变追踪与海洋生态参数精细化监测。同时，该技术还能够捕捉宇宙深处脉冲星释放的微弱紫外信号，为深空探索任务提供了新型光子级探测方案[1-2]。光子计数成像是对单个光子进行定位，空间中微弱的单光子打入微通道板，经过光电倍增后输出光电子团，光电子团落在二维的位敏探测器阳极上，进而生成带有光电子团位置信息的脉冲电信号。脉冲信号经过电荷灵敏放大器，输出到后续的成形系统中。通过对脉冲的准确识别与峰值提取，能实现单光子位置的精确定位，从而实现光子计数成像。

目前，空间科学仪器对紫外目标存在着高分辨率、高计数率的观测需求。为实现高空间分辨率，需对探测器输出的含噪声信号进行处理，提高脉冲幅值提取精度。随着数字化信号处理技术越来越成熟，在滤波成形、基线恢复、堆积识别等方面展开了广泛应用。针对光子计数成像信号的脉冲成形设计，可以有效提高脉冲幅值精度，改善信号读出质量，通过调节对应参数也能灵活适应不同环境下的探测任务[3-6]。

滤波与成形是数字信号处理（DPP）的重要环节，设计低通、高通、带通、带阻等类型滤波器可去除信号中的噪声和干扰。早期DPP主要通过合成不同形状的脉冲（如三角形、梯形、高斯等）来对采样的模拟信号进行处理[7-9]。2016年Jodanov对信号进行反褶积处理，从而消除了高通网络的响应，反卷积脉冲再通过时不变的数字滤波器处理，合成梯形、三角形或尖点状形脉冲[10]。葛青根据Sallen-Key（S-K）模拟准高斯整型滤波器电路，利用基尔霍夫定律和双线性变换实现了数字核脉冲的准高斯脉冲生成[11]。2017年，刘寅宇等基于CR-RCm实现了核脉冲信号的数字高斯成形。但上述两种处理方法均难以实现对称成形[12]。2022年，Ordanov等介绍了数字展开技术，该技术通过将数字信号展开成单位脉冲，然后与期望脉冲形状卷积合成任意形状脉冲[13]。2023年，张怀强等利用合成成形法实现了梯形、三角形与准高斯型的统一传递函数[14-15]。

本文通过对模拟光电子脉冲信号和实际采样的脉冲信号进行合成成形处理，并对成形参数优化与幅值提取精度的相关性进行分析。这一研究有助于拓展光子计数成像领域的信号处理方法，提升脉冲幅值精度，改善信号读出质量以适应不同环境的探测任务能力，为相关领域的科学研究和实际应用提供技术支持。

1 脉冲成形方法

采用的脉冲成形算法流程如图1所示，第一步对探测器输出的双指数信号进行反褶积得到冲击信号，第二步对冲击信号进行卷积运算，得到目标脉冲形状。



图1 成形流程图

1.1 光电子脉冲信号模型

光电子脉冲信号具有快速上升沿和缓慢下降沿的特性，利用双指数信号模型近似为：

$$v(t)=A\left(e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}\right)u(t-t_0) \tag{1}$$

式中，τ_1和τ_2为探测器信号的衰减时间常数，它们共同决定信号衰减速度，一般要求$\tau_1 \gg \tau_2$，A为信号幅度，t为信号持续时间，$u(t-t_0)$为阶跃函数，t_0为信号起始时间。对双指数信号模型进行离散化，设T_s为采样周期，n为离散时间索引，取整数，T_0为离散的信号起始时间，即：

$$v[n]=A\left(e^{-\frac{nT_s-T_0}{\tau_1}}-e^{-\frac{nT_s-T_0}{\tau_2}}\right)u[nT_s-T_0] \tag{2}$$

1.2 反褶积运算

为了精确定位脉冲位置以及满足后续成形需求，该反褶积系统的传递函数可表示为[15]：

$$H_1(z)=\frac{(1-M_1z^{-1})(1-M_2z^{-1})}{(M_1-M_2)z^{-1}} \tag{3}$$

式中，系数$M_1=\exp(-T_s/\tau_1)$，$M_2=\exp(-T_s/\tau_2)$。对公式（3）进行Z逆变换，得到冲击成形递归方程：

$$\delta[n]=\frac{v[n+1]-(M_1+M_2)v[n]+M_1M_2v[n-1]}{M_1-M_2} \tag{4}$$

1.3 合成成形

构建合成成形脉冲形状$y_j(i)$,其中i为信号时间,j为分段形状序号。组合形状$y_j(i)$的Z域表达为$U(z)$,为实现冲击信号输入,成形信号输出,则设计成形运算的传递函数为$H_2(z)=\dfrac{U(z)}{\delta(z)}$,$\delta(z)$为冲击函数$Z$域表达式。$y_j(i)$分段函数离散时域数学模型为:

$$\begin{cases} y_1[i]=0.5(-1-i)i \\ y_2[i]=y_2[n]-0.5(n-i)(n+2m-i) \\ y_3[i]=0.5(2n+2m-i)(2n+2m-i+1) \\ y_4[i]=0 \end{cases} \tag{5}$$

式中,y_1的范围为$0\leqslant i<n$,y_2的范围为$n\leqslant i<n+2m$,y_3的范围为$n+2m\leqslant i\leqslant 2n+2m$,$y_4$的范围为$2n+2m<i$。其形状如图2所示,$n$表示上升沿或下降沿曲线宽度,$2m$表示中心曲线宽度。通过调节参数$m$和$n$,可进行成形形状的调节。

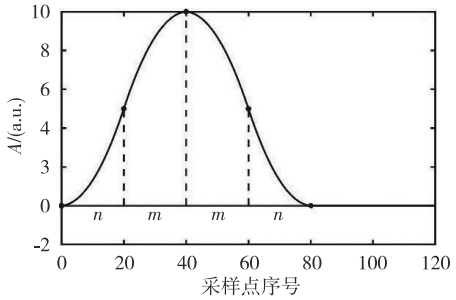


图2　合成成形脉冲

采用冲击响应不变法,由公式(6)表示,对合成成形形状邻项差分$y_j[i]-y_{j-1}[i]$,然后进行Z域变换,得到传递函数$Y_j(z)$,其中$j=1,2,3,4$。

$$Y_j(z)=Z\left(y_j[i]-y_{j-1}[i]\right)u\left(i-I_j\right) \tag{6}$$

成形曲线的传递函数为:

$$\begin{cases} Y_1(z)=\dfrac{z^{-1}}{\left(1-z^{-1}\right)^3} \\ Y_2(z)=z^{-n}\left(\dfrac{p_0+p_1z^{-1}+p_2z^{-2}}{\left(1-z^{-1}\right)^3}\right) \\ Y_3(z)=z^{-m-2n}\left(\dfrac{q_0+q_1+q_2z^{-1}}{\left(1-z^{-1}\right)^3}\right) \\ Y_4(z)=z^{-2n-2m}\left(\dfrac{-z^{-2}}{\left(1-z^{-1}\right)^3}\right) \end{cases} \tag{7}$$

其中,系数p_0,p_1,p_2,q_0,q_1,q_2的值为:

$$\begin{cases} p_0=2mn \\ p_1=m-n-1.5-4mn \\ p_2=m-n-1.5-2mn \\ q_0=-n-n^2 \\ q_1=m+n+0.5+2n^2 \\ q_2=m-n+0.5-n-n^2 \end{cases} \tag{8}$$

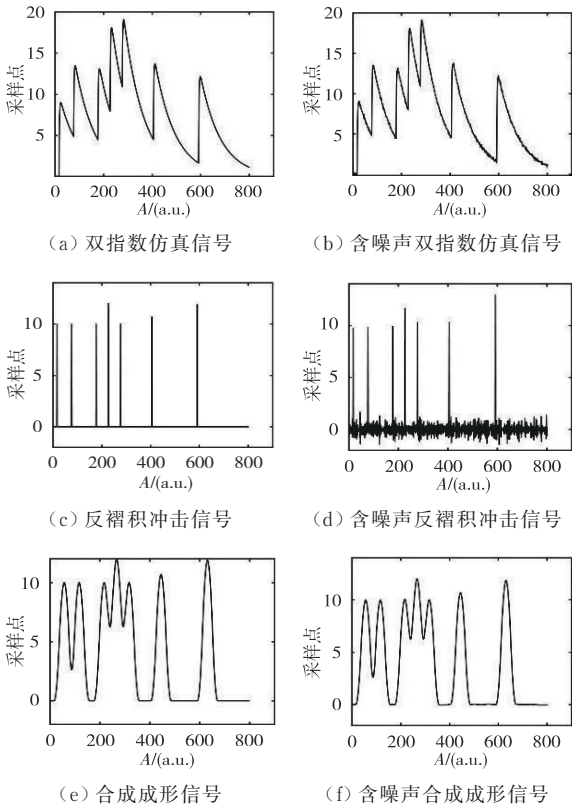
对传递函数$Y_j(z)$进行求和并整理得到分母滤波系数b_M与分子滤波系数a_N,其关系式为:

$$H_2(z)=\sum_{j=1}^{4}Y_j(z)=\frac{\sum_{M=0}^{2m+2n+2}b_Mz^{-M}}{\sum_{N=0}^{3}a_Nz^{-N}} \tag{9}$$

2 算法实现

2.1 合成成形仿真实现

首先生成有无噪声两种条件下的双指数信号作为输入,用第1节中描述的脉冲成形方法对输入脉冲进行成形,成形结果如图3所示。其中,对于含有噪声的输入信号,设置白噪声均值为0,标准差为0.1。设置成形参数$m=20$,$n=20$。



(a) 双指数仿真信号　(b) 含噪声双指数仿真信号

(c) 反褶积冲击信号　(d) 含噪声反褶积冲击信号

(e) 合成成形信号　(f) 含噪声合成成形信号

图3　双指数脉冲合成成形仿真图

仿真结果表明,反褶积能实现脉冲的精确定位,同时也会突出高频噪声信号。可通过设定阈值

以判断脉冲发生位置，进而实现对合成成形脉冲的中心定位与脉冲幅度提取。脉冲成形后指数信号的拖尾明显缩短，各脉冲成形宽度相等且符合参数m和n的设置值。

2.2 合成成形法与Sallen-Key成形法比对

Sallen-Key成形滤波器电路是一种信号处理中常用的有源滤波电路，它通过改变运算放大器、电容和电阻网络的组合来调节输出信号的带通范围。指数衰减信号通过S-K成形滤波器时，信号的衰减趋势得到平滑，并逐渐趋近于准高斯形。

在实际应用中，需要调试电阻R与电容C的组合进而改变成形参数K，实现相对稳定的脉冲，其中成形参数$K=RC/\triangle t$。通过多级S-K滤波不断逼近对称高斯形，一般二级以上再增加级数对对称性影响较弱，因此通常采用两级S-K滤波成形。不同成形参数K与滤波级数成形效果如图4和5。

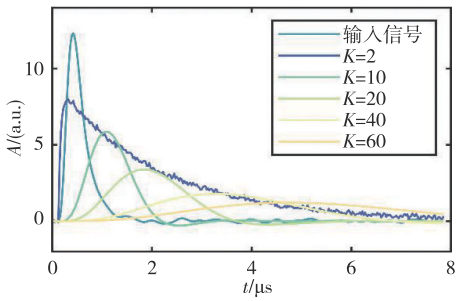


图4 不同成形参数K的Sallen-Key成形效果

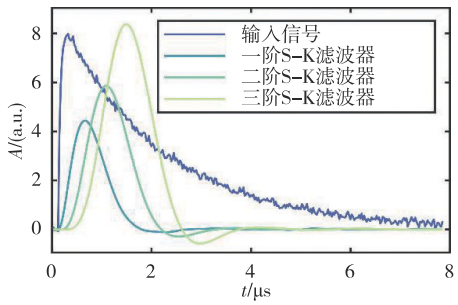


图5 各级Sallen-Key成形效果

相比合成成形法，S-K成形存在对称性不足以及拖尾震荡的缺陷，当处于高计数率工作状态时，前一个脉冲的震荡对相邻的后续脉冲产生影响，降低后续脉冲幅值提取精度。同脉冲宽度的两种脉冲成形对比如图6所示。

通过对比相同宽度Sallen-Key成形与合成成形信号，可以发现以下特点：(1)合成成形法相比S-K成形法具有更好的对称性且无震荡拖尾，更有利于减少相邻脉冲间的干扰，提高幅值精度；(2)合成成形法的成形参数m，n具有明确的几何意义，成形宽度精确符合$2(m+n)$，而S-K成形法的成形参数K和成形级数共同决定成形宽度与脉冲形状，成形宽度不明确，需要依靠经验调节或定标试验；(3)合成成形法过程中的反褶积输出信号能实现精确的脉冲定位，并能有效进行脉冲判弃，而S-K成形法则对极零后的信号直接进行成形，当脉冲间距低于脉冲宽度时，需要引入更复杂的算法才可以实现堆积判弃。

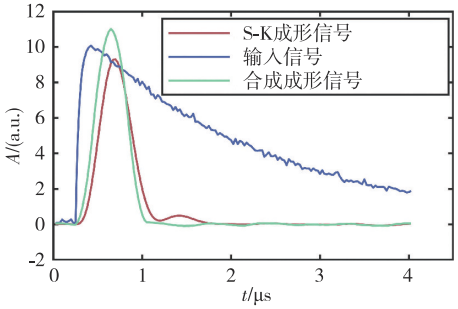


图6 同脉冲宽度的两种脉冲成形对比

3 脉冲成形参数优化

以成形脉冲中心区域的均值作为脉冲幅值。A_v为中心区域采样数，中心区域采样数影响幅值大小与幅度提取精度。在成形参数$m=5$，$n=5$，中心区域采样数$A_v=5$的情况下，脉冲幅值提取如图7所示。

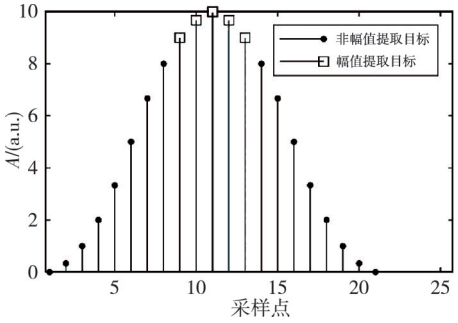


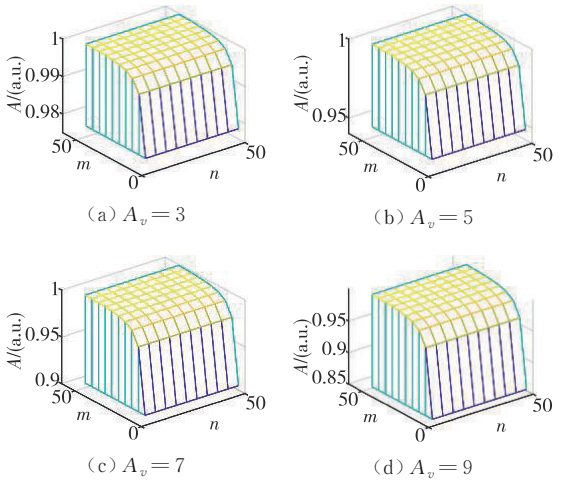
图7 幅值提取示意图

3.1 脉冲幅值归一化系数

中心区域求得的幅值增益受成形参数与中心区域采样数A_v的影响，即提取的幅值与实际脉冲幅值存在缩放偏差，需要分析脉冲幅值归一化系数。在无噪声条件下进行仿真，设置m，n值均为5～50，A_v值为3～9。设定输入幅值为1的双指数信号，则仿真结果如图8所示。

结果表明，主要影响幅值缩放偏差的因素是成

形参数 m 与中心采样数 A_v，当 m 过小时，提取幅值低于原输入信号幅值，需要对提取幅值进行归一化修正。当 $A_v < 2m-1$ 时，脉冲幅值与脉冲上升沿曲线宽度 n 无关。

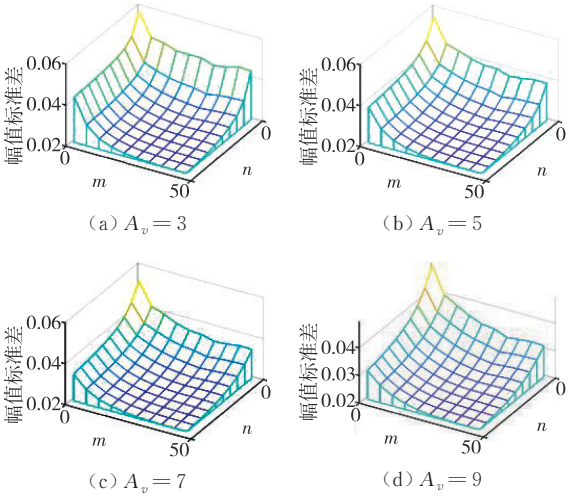


（a）$A_v=3$　（b）$A_v=5$　（c）$A_v=7$　（d）$A_v=9$

图 8　不同成形参数的幅值

3.2　幅值提取精度与参数关系

利用上述成形幅值归一化系数，对成形结果修正。仿真设置中，同样针对不同的 m，n 值与中心区域采样数 A_v，输入信号幅度值为 1，噪声标准差为 0.1，进行 10 000 次测量，用幅值提取的标准差来表示幅值误差。结果如图 9 所示。



（a）$A_v=3$　（b）$A_v=5$　（c）$A_v=7$　（d）$A_v=9$

图 9　不同参数的幅值误差

随着中心区域采样数的提升，整体幅值误差有所降低。幅值提取的标准差整体随成形参数 m，n 的增加而收敛于 0.02，且随 m 值的变化更为明显，这与成形原理有直接关系。成形参数 m 控制钟形平顶宽度，m 的增加会有更多的中心区域采样点可以提供，从而中心区域采样取平均得到平滑滤波效果，能有效提高幅值精度。

3.3　多脉冲幅值提取

考虑白噪声、脉冲幅值随机变化、脉冲堆积等更符合实际应用的场景进行仿真。设置白噪声均值为 0，标准差为 0.1。脉冲幅度真实值满足高斯分布，均值 10，标准差为 2。脉冲数量为 5×10^4，脉冲计数率为 200 kcps，脉冲间隔满足泊松分布。设置采样 $f_s=40$ MHz。双指数脉冲信号时间常数 $\tau_1=83/f_s$，$\tau_2=1.8/f_s$。信号生成结果如图 10 所示。

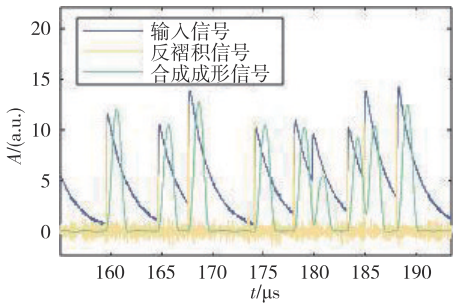


图 10　多脉冲仿真信号

3.3.1　堆积判弃

根据脉冲间隔选择一定程度的判弃。采用的判据为两成形脉冲完全分离，即相邻脉冲间隔 $L \geqslant 2m+2n$。以 $m=21$，$n=21$ 为例，当相邻脉冲间隔 $L<84$ 时，则对应两脉冲直接舍弃不计入。如图 11 所示，其中从临界堆积 a 到完全重合 d 表示逐渐递增的堆积程度。

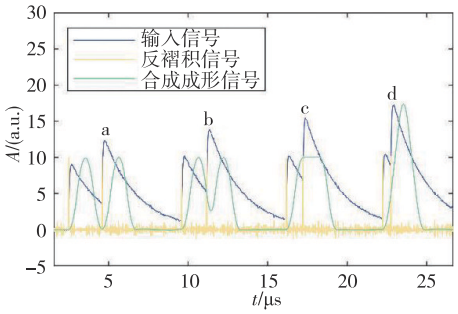


图 11　不同程度堆积

可利用反褶积的冲击信号进行脉冲定位，通过脉冲间隔来推断堆积程度，以实现堆积判弃。然而，反褶积过程具有高通滤波性质，冲击信号的噪声被放大，需要预设合适的脉冲识别阈值 A_{ts}。当幅度过小的脉冲反褶积后，其冲击信号会被噪声淹没，造成脉冲漏识别。过低的识别阈值反而会因过

大的噪声导致脉冲信号的误识别。如图12所示，当识别阈值位于a位置时会导致漏识别，当识别阈值位于b位置时会导致误识别。

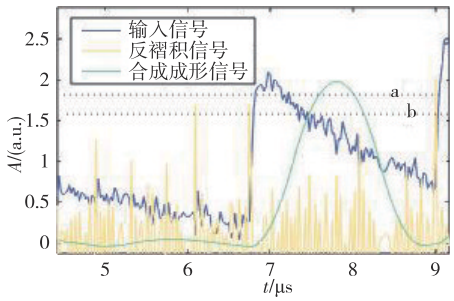


图12 误识别与漏识别

漏识别过多会导致堆积状态判断错误，把本该是堆积的脉冲误认为没有堆积，进而在参与计数中，降低了整体幅度提取精度。误识别会增加无效的零幅度脉冲计数，若堆积判断失误，会导致本该有效脉冲被判定为堆积进而不参与计数。在本次仿真条件下，利用先验的真实脉冲信息分析了不同阈值条件下的漏识别数与误识别数，结果见表1。

表1 识别阈值与漏识别率和误识别率关系

识别阈值A_{ts}	漏识别率/%	误识别率/%
2	0.012	0.23
2.5	0.014	0.044
3	0.018	0
3.5	0.050	0
4	0.164	0

3.3.2 成形参数对幅值精度的影响

统计幅度提取误差，脉冲捕获率，对无堆积测量幅值与实际值进行回归分析。部分数据见表2，当参数设置为m=49，n=49，A_v=9时，其误差分析如图13和14所示，线性关系如图15所示。可见多脉冲仿真结果与单脉冲仿真结果接近，幅值精度随着成形参数m，n与中心采样数A_v的增加而减少，最后均方根误差接近0.02。相比于原信号的标准差为0.1的噪声，该算法有效提高了幅值提取的精确度。

表2 成形参数与幅值提取关系

m	n	A_v	η/%	$RMSE$	R^2
21	21	3	44.7	0.026 6	0.999 8
21	21	9	44.7	0.025 7	0.999 8
49	49	9	1.6	0.019 8	0.999 9
49	21	9	25.2	0.022 6	0.999 9
21	49	9	25.2	0.022 0	0.999 9

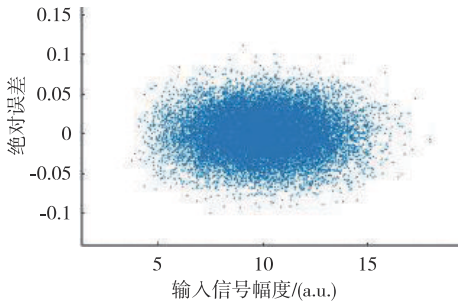


图13 绝对误差

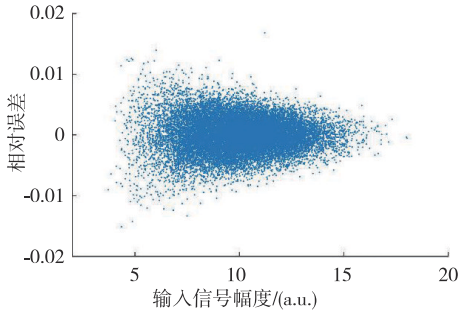


图14 相对误差

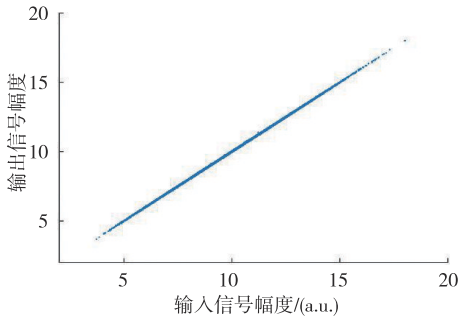


图15 幅值误差分析

4 实验验证

搭建光子计数实验平台，采用均匀光照射基于微通道板的光子计数成像探测器，并经过前置放大器处理后得到双指数脉冲信号序列，利用采集卡收集真实光子脉冲信号，再通过计算机进行离线处理。流程如图16所示。

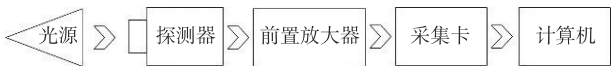


图16 实际信号获取流程

由于实际读出信号具有下冲，需要先进行极零相消预处理，得到无下冲的双指数信号。然后对极零相消后的非堆积脉冲进行抽样，利用最小二乘法对目标信号进行指数拟合，得到极零相消后的信号时间常数，拟合结果如图17所示，拟合优度R^2=

0.995 9，拟合效果优良。实际成形效果如图18所示。

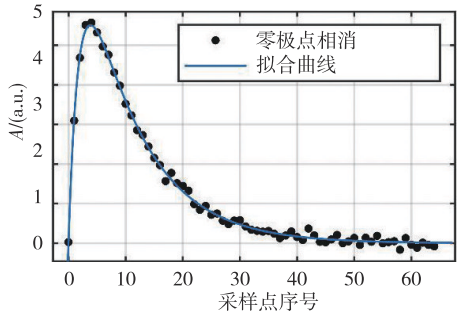


图17　极零相消信号拟合

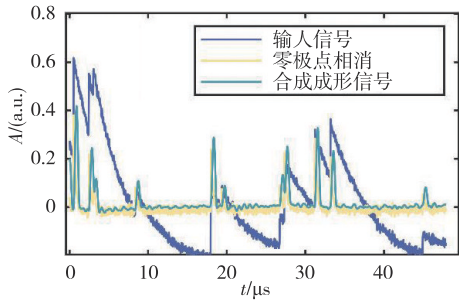


图18　实际输入信号合成成形结果

为了评价实验数据幅值提取精度，采用K-S检验方法（Kolmogorov-Smirnov test），它是一种非参数假设检验，主要用来检验一组样本是否来自于某个概率分布，或者比较两组样本的分布是否相同。

为了验证实测数据中合成成形法的幅值精度，利用更宽成形宽度能有效降低噪声影响提高幅值精度这一先验知识，进行了如下H0假设：待检验的成形幅值符合成形参数为$n=22$，$m=22$的合成成形脉冲幅值分布。对实测信号分布进行了4种幅值提取方法。样本A为无脉冲成形直接提取指数信号上升沿，样本B为成形参数$m=10$，$n=10$的合成成形，样本C为成形参数$K=10$的两级S-K滤波成形，样本D为$m=22$，$n=22$的合成成形。

将样本D中的15 050个版本分为10 000个样本的参考组D1与5 050个样本的自检验组D2。直接提取法、合成成形法与S-K滤波都利用反褶积进行脉冲定位，确保样本来源一致且数量相同，A，B，C样本数皆为28 403。

对检验组（A，D1），（B，D1），（C，D1），（D2，D1）分别进行双样本K-S检验，设置显著性水平$\alpha=0.01$。所得结果如表3所示。表中D值为进行计算的两组样本累积分布函数的最大差异值，是K-S检验的统计量，范围为0～1，D越小，说明两组分布越相似。p值定义为：在原假设H0成立条件下，观察到当前D值的概率。H值为1时，指对应的$p\leqslant\alpha$，拒绝H0假设；H值为0时，指对应的$p\geqslant\alpha$，接受原假设。

表3　K-S检验结果

检验组	（A，D1）	（B，D1）	（C，D1）	（D2，D1）
D	0.1970	0.0193	0.1596	0.0149
p	1.9×10^{-219}	0.0156	1.1×10^{-6}	0.4439
H	1	0	1	0

检验结果表明，合成成形法更接近标准训练组的分布。即从统计的角度上，对实测数据进行合成成形法相比直接提取法与S-K成形法得到的结果更接近真实输入。

5　结论

本文设计了参数可调节的光电子脉冲合成成形法，分析了上升沿曲线宽度n、半中心曲线宽度m以及幅度提取时的中心区域采样数A_v对脉冲幅值误差的影响。结果表明，成形后提取的脉冲幅值随半中心曲线宽度m的减少而降低，随中心区域采样数A_v的增加而降低，幅度误差随着三个成形参数的增加而显著下降，而逐渐收敛于标准差0.02。当成形脉冲总宽度固定时，成形参数$m=n$能实现幅值提取的最低误差。在滤波器长度有限的条件下，选择成型参数m，n相近的方案更能提高成形后的幅值精度。并且，通过实验验证，分别设置了训练组与测试组，进一步证明了合成成形法提取脉冲幅值准确性优于直接提取法与Sallen-Key滤波成形法。

对于基于微通道板的光子计数成像探测器，这种光电子脉冲成形方法有助于提高幅值提取准确度，精确的脉冲幅值提取是实现高分辨率图像重构的关键，为提升成像系统的整体性能提供支持。

参考文献：

[1] Alkadhi H, Runge V. The future arrived photon-counting detector CT [J]. Investigative Radiology, 2023, 58(7): 439-440.

[2] Han Z, Song K, Zhang H, et al. Photon counting imaging with low noise and a wide dynamic range for aurora observations [J]. Sensors, 2020, 20(20): 5958.

[3] 王乾丞. 核脉冲的参数识别及自适应成形方法[D]. 成都：成都理工大学, 2021.
Wang Qiancheng. Parameter identification and adaptive

shaping method of nuclear pulse [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.

[4] Tremsin A S, Vallerga J V, Siegmund O H W. Overview of spatial and timing resolution of event counting detectors with microchannel plates [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 949: 162768.

[5] 寇松峰, 陈 钱, 顾国华, 等. 基于APD阵列的单光子计数成像研究[J]. 半导体光电, 2008, 29(6): 968-972.
Kou Songfeng, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Research on photon counting image technology based on APD arrays [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(6): 968-972.

[6] 王 玲, 刘 博, 李志康, 等. 基于单像素单光子探测的目标识别与跟踪方法[J]. 半导体光电, 2023, 44(2): 272-276.
Wang Ling, Liu Bo, Li Zhikang, et al. Target recognition and tracking method based on single pixel single photon detection [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(2): 272-276.

[7] Kantor M Y, Sidorov A V. Shaping pulses of radiation detectors into a true Gaussian form [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(1): P01004.

[8] 黄宇雁, 宫 辉, 李荐民. 高计数率下的实时梯形成形算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(5): 521-524.
Huang Yuyan, Gong Hui, Li Jianmin. Real time trapezoidal shaping algorithm at high count rates [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2017, 57(5): 521-524.

[9] Hong X, Li L, Wu J, et al. An adaptive digital filter for quasi-Gaussian pulse shaping [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 18(4): P04002.

[10] Jordanov V T. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing. Part 1: Unfolding [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 805: 63-71.

[11] 葛 青. 射线能谱仪核脉冲信号数字成形算法研究与实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Ge Qing. Research on digital shaping algorithm and real-time realization for nuclear pulse signal of the radial energy spectrometer [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.

[12] 刘寅宇, 张京隆, 周 荣, 等. CR-RCm滤波器数字化研究[J]. 核技术, 2017, 40(6): 48-52.
Liu Yinyu, Zhang Jinglong, Zhou Rong, et al. Digitalization of CR-RCm filter [J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(6): 48-52.

[13] Jordanov V T, Jordanova K V. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing, Part 2: Synthesis [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1044: 167421.

[14] 张怀强, 陈 壑, 钱云琛, 等. 合成成形法在数字核脉冲信号处理中的应用研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 302-309.
Zhang Huaiqiang, Chen He, Qian Yunchen, et al. Application rescarch of synthctic shaping mcthod in digital nuclear pulse signal processing [J]. Journal of East China University of Technology: Natural Science, 2023, 46(3): 302-309.

[15] 陈 壑. 基于合成成形的数字多道脉冲幅度分析器设计[D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
Chen He. Design of digital multichannel pulse amplitude analyzer based on synthetic forming method [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2023.

作者简介:

李成伟(1998—),男,广东省中山市人,硕士研究生,主要研究方向为光电子计数成像;

韩振伟(1982—),男,吉林省长春市人,博士,主要研究方向为空间光电探测。