



طیف سنجی دیجیتال اشعه گاما با استفاده از آشکارساز NaI و دیجیتالیزر ارزان (آهنگ نمونه برداری پایین): تابع مدل جدید بر پایه هم‌پیچشی

هادی کسانی^{۱*}، صالح اشرفی^۱

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده:

در سال‌های اخیر، ترکیبی از دیجیتالیزرهای موجود در دسترس عموم (COTS) در طیف‌سنجی دیجیتال اشعه گاما استفاده شده است. در این کار، یک مطالعه امکان سنجی برای استفاده از کارت صوتی رایانه شخصی (PC) به عنوان دیجیتالیزر در طیف‌سنجی دیجیتال اشعه گاما با استفاده از آشکارساز NaI(Tl) انجام شده است. به همین منظور، طول زمانی پالس‌های خروجی آشکارساز NaI توسط پیش تقویت کننده به $300 \mu\text{s}$ افزایش داده شده است. جمع‌آوری داده‌ها توسط ابزار جمع‌آوری داده نرم‌افزار متلب صورت پذیرفت. پالس نمونه با میانگین‌گیری از ۱۰۰ پالس بدون رخداد انباشت بدست آمد. خط پایه سیگنال با استفاده از میانگین‌گیری از ۱۰ نمونه قبل از شروع پالس و کاستن از کل پالس انجام شده است. تعیین زمان ظهور پالس‌ها توسط فیلتر میانگین انجام شد. تابع مدل هم‌پیچشی به منظور تصحیح اثر مخرب رخدادهای انباشت معرفی شد. برازش توابع مدل روی پالس تجربی توسط الگوریتم برازش غیر خطی انجام شد. عملکرد این تابع مدل در تصحیح رخدادهای انباشت بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: طیف‌سنجی دیجیتال اشعه گاما، چشمه گامای Cs-137، آشکارساز NaI، تابع مدل پالس.

Gamma ray digital spectroscopy using NaI detector and a low-cost digitizer (low sampling rate): A new model function based on convolution

Hadi Kasani^{1*}, Saleh Ashrafi¹

1 Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract:

A combination of publicly-available digitizers (COTS) has been used in digital gamma-ray spectroscopy in recent years. In this work, a feasibility study was undertaken to use a personal computer (PC) sound card as a digitizer in digital gamma-ray spectroscopy with NaI(Tl) scintillation detector. To this end, the duration of the output pulses of the NaI detector was increased to $300 \mu\text{s}$ by the preamplifier. Data collection was done by data acquisition toolbox of MATLAB software. The sample pulse was obtained by averaging 100 pulses of pile-up free events. The signal baseline correction was performed by averaging 10 samples before the start of the pulse and reducing the total pulse from the mean value. The arrival time of the pulses was determined by the moving average filter. The convolution model function was introduced to correct the destructive effect of pile-up events in spectrum. The fitting of the model functions to the experimental pulse was performed by a non-linear fitting algorithm. The performance of this model function in pile-up correction is investigated.

Keywords: Digital gamma-ray spectroscopy, Cs-137 gamma source, NaI detector, Pulse model function.

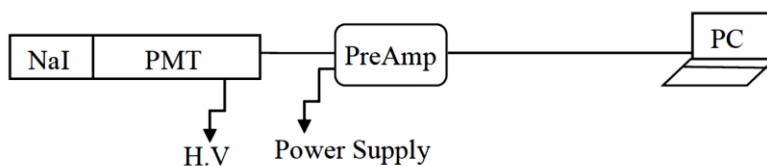
Email: hadi.kasani@gmail.com

۱. مقدمه

طیف سنجی اشعه گاما کاربردهای بسیار وسیعی در علوم موثر در صنعت [۱]، پزشکی [۲] و غیره پیدا کرده است. با ظهور دیجیتالسازهای سریع همراه با پردازشگرهای قدرتمند، روشهای تحلیل دیجیتال خروجی آشکارسازهای اشعه گاما، تنوع و اهمیت زیادی پیدا کرده اند [۳]. در این بین، دیجیتالسازهای در دسترس عموم (COTS^۱) به دلیل داشتن هزینه پایین و کارکرد آسان مورد توجه قرار گرفته اند [۴]. امروزه در هر وسیله ارتباطی و شغلی الکترونیکی مکانیزمی برای ذخیره و ارسال صدا وجود دارد. این وظیفه را کارت صوتی با دیجیتالسازی امواج صوتی و پردازش آن توسط پردازنده (رایانه شخصی، رایانه دستی، رایانک یا تلفن همراه هوشمند) بر عهده دارد. طیف‌سنجی دیجیتال اشعه گاما با استفاده از آشکارساز NaI، هم با استفاده از دیجیتالسازی مستقیم پالس‌های آند [۵] و هم با استفاده از دیجیتالسازی پالس‌های خروجی پیش‌تقویت‌کننده [۶] قابل انجام است. در مورد اول سطح زیر پالس و در مورد دوم ارتفاع پالس بیانگر انرژی اشعه گامای فرودی به آشکارساز می‌باشد. در این کار ما با استفاده از کارت صوتی کامپیوتر شخصی پالسهای خروجی آند آشکارساز NaI را بعد از پیش‌تقویت‌کننده دیجیتالسازی کرده و به منظور بدست آوردن طیف انرژی چشمه گامای Cs-137، تابع مدل جدیدی را پیشنهاد می‌کنیم. با استفاده از مدارهای شکل‌دهنده یا به طور ساده مدار CR میتوان پهنای خروجی پالس پیش‌تقویت‌کننده را تنظیم کرد. ما در این مقاله پهنای زمانی پالس‌های آند را افزایش داده‌ایم تا هر پالس تعداد نمونه‌های بیشتری را به خود اختصاص دهد. بدست آوردن مشخصات پالس‌ها، اطلاعات ارزشمندی از ذره ورودی به آشکارساز را به ما خواهد داد. بنابراین روش‌هایی که تابع مدل مناسبی را بر پالس‌های تجربی برازش کنند، بسیار اهمیت دارند. تا کنون چندین مدل برای توصیف پالس‌های سوسوزن بر اساس پدیده‌های فیزیکی مرتبط با فرآیند سوسوزنی و تبدیل فتوالکترونی^۲ پیشنهاد شده است. مرسوم‌ترین آنها توابع مدل تک‌نمایی^۳ و دونمایی^۴ می‌باشند [۷]. اخیراً تابع مدل جدیدی بر پایه هم‌پیچشی^۵ برای پالس‌های آشکارساز NaI معرفی شده است [۸]. در این مقاله تابع مدل جدیدی بر پایه هم‌پیچشی تابع گوسی با تابع نمایی برای پالس‌های بعد از پیش‌تقویت‌کننده آشکارساز NaI معرفی می‌شود. یکی از روش‌های تصحیح اثر مخرب پالس‌های انباشت^۶ بر روی طیف انرژی، روشی است که در آن پالس‌ها یک-به-یک بررسی می‌شوند. در این مقاله با استفاده از تابع مدل جدید پیشنهادی و روش بررسی قدم به قدم، اثر مخرب پالس‌های انباشت در طیف اشعه گاما تصحیح می‌شود.

۲. روش کار

روش ما برای برای جمع‌آوری دیجیتال پالس‌های حاصل از آشکارساز سوسوزن NaI که از آند به پیش‌تقویت‌کننده متصل هستند استفاده از کارت صدای کامپیوتر (به عنوان مبدل آنالوگ به دیجیتال) می‌باشد. نرخ نمونه‌برداری توسط کارت صوتی حداکثر ۹۶۰۰۰ نمونه بر ثانیه می‌باشد. شمایی از چیدمان تجربی برای جمع‌آوری دیجیتال پالس‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شمایی از چیدمان تجربی جمع‌آوری سیگنال دیجیتال

^۱ Commercial off-the-shelf or commercially available off-the-shelf

^۲ Photoelectron conversion

^۳ Single-exponential

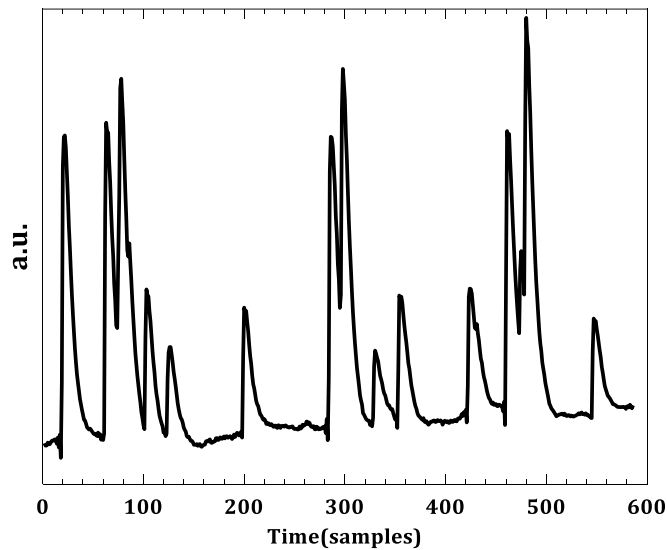
^۴ Bi-exponential

^۵ Convolution

^۶ Pile-up

به منظور جمع‌آوری داده از ابزار Data Acquisition نرم‌افزار متلب استفاده شده است. چشمه با میزان اکتیویته ۷ میکروکوری در فاصله ۶ سانتی متری از جلوی آشکارساز قرار می‌گیرد و پالسها در آرایه های سطری (ویوفورم^۷) ذخیره می‌شوند. شکل ۲ قسمتی از ویوفورم حاصل از خروجی پیش تقویت کننده آشکارساز NaI را نشان میدهد.

یکی از مراحل مهم در طیف‌سنجی دیجیتال اشعه گاما تعیین زمان ظهور هر یک از پالسهای موجود در ویوفورم میباشد. در این مقاله با استفاده از فیلتر میانگین^۸ زمان ظهور پالسها را تعیین کرده‌ایم. همچنین با میانگین گیری چند نمونه قبل از هر پالس و کسر مقدار آن از کل پالس، خط پایه را تصحیح کرده‌ایم. بعد از جداسازی تمامی پالسهای موجود در ویوفورم، آنها را در یک ماتریس مربعی ذخیره کرده و با استفاده از الگوریتم غیر خطی، تابع مدل مورد نظر را بر هر پالس برازش می‌کنیم.



شکل ۲: قسمتی از ویوفورم تجربی دیجیتالی سازی شده توسط کارت صوتی.

تابع مدل مورد نظر با استفاده از در هم پیچشی دو تابع گوسی و نمایی بدست می‌آید. بعد از محاسبات تابع مدل زیر بدست می‌آید:

$$n(t) = \frac{k}{\sqrt{\pi}} \exp \left[k(S-t) + \frac{(k\sigma)^2}{2} \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{S-t+k\sigma 2}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن k ثابت زمانی تابع نمایی، S مکان قله تابع گوسی و σ پهنای تابع گوسی را کنترل می‌کند. همچنین تابع erf بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (2)$$

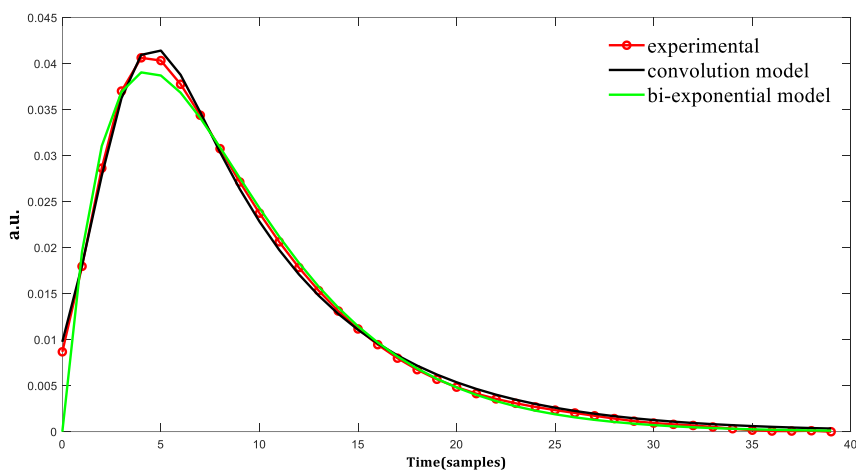
برای تابع erf می‌توان از توابع تقریبی استفاده کرد [۹].

⁷ Waveform

⁸ Moving Average Filter

۱.۲. نتایج و بحث

به منظور بدست آوردن تابع نمونه از داده‌های تجربی، تعداد ۱۰۰ پالس که بدون هم‌پوشانی با پالسهای دیگر باشند (انباشت آزاد^۹) را جدا کرده و میانگین این پالس‌ها را به عنوان پالس نمونه در نظر می‌گیریم. با استفاده از برازش غیر خطی لونبرگ-مارگارت^{۱۰}، دو تابع مدل دونمایی و هم‌پیچشی را بر پالس نمونه تجربی برازش نمودیم. شکل ۳ نتایج برازش را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نتیجه برازش توابع مدل بر روی پالس نمونه تجربی.

اگر مقادیر برازش شده را از مقادیر متناظر پالس تجربی کم کنیم و جذر میانگین مجذور (RMSE^{۱۱}) آنها را بدست آوریم، مقادیر آن میزانی از کیفیت برازش را نشان خواهد داد. جدول ۱ مقادیر RMSE را برای دو تابع مدل نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، تابع مدل هم‌پیچشی هم‌خوانی بهتری نسبت به تابع مدل دونمایی با پالس نمونه تجربی در این کار را دارا می‌باشد.

جدول ۱. نتایج میزان برازش توابع مدل مختلف بر روی پالس تجربی

تابع مدل	RMSE
دونمایی	15.2E-4
هم‌پیچشی	5.30E-4

به منظور تصحیح رخدادهای انباشت، از اولین پالس ویوفورم شروع کرده و سهم دنباله این پالس در افزایش ارتفاع پالس دوم از آن کاسته می‌شود. سپس پالس دوم بازسازی^{۱۲} شده و در مرحله بعد سهم دنباله پالس بازسازی شده از پالس سوم کاسته می‌شود و پالس سوم نیز به نوبه خود بازسازی می‌شود. این کار تا بازسازی تمام پالس‌های ویوفورم ادامه می‌یابد و در نهایت ارتفاع واقعی هر پالس بدست می‌آید.

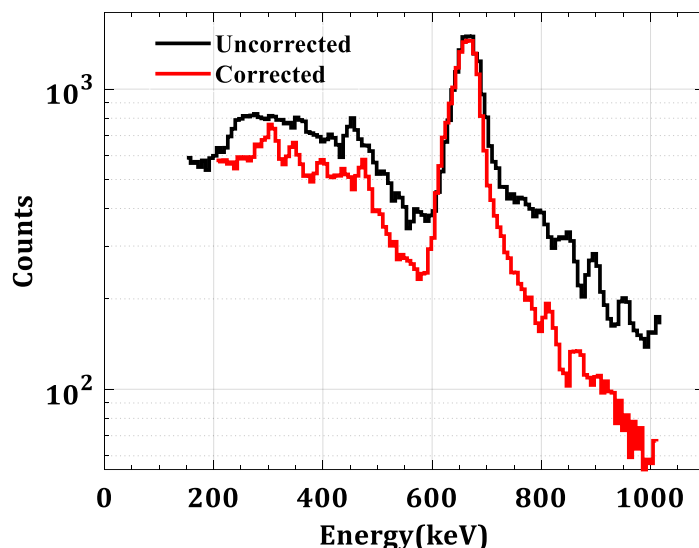
⁹ Pile-up Free

¹⁰ Levenberg–Marquardt

¹¹ Root Mean Square Error

¹² Reconstruction

آنچه که دارای اهمیت است، چگونگی پیش بینی ادامه دنباله پالس^{۱۳} می‌باشد. شکل ۴ طیف انرژی اشعه گاما قبل و بعد از تصحیح اثر مخرب رخدادهای انباشت بر روی طیف انرژی اشعه گاما را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تصحیح اثر مخرب رخدادهای انباشت بر روی طیف انرژی اشعه گامای چشمه سزیم-۱۳۷ با استفاده از تابع مدل هم‌پیچشی

واسنجی^{۱۴} طیف انرژی توسط دو نقطه در طیف انرژی (قله تمام انرژی و لبه کامپتون) صورت گرفته است. پهنای زمانی پالسها در حدود $300 \mu\text{s}$ و نرخ شمارش در شکل ۴ در حدود 4.65 kcps می‌باشد. قدرت تفکیک انرژی بدون تصحیح رخدادهای انباشت 6.92 ± 0.43 درصد و با تصحیح اثر مخرب رخدادهای انباشت 6.42 ± 0.43 درصد می‌باشد. پهنای قله تمام انرژی در نصف ارتفاع توسط نرم‌افزار ORIGIN بدست آمده است. با توجه به نتایج گزارش شده در مرجع [۶]، قدرت تفکیک انرژی بدون تصحیح رخدادهای انباشت 9.1 درصد و با تصحیح اثر مخرب رخدادهای انباشت 8.6 درصد می‌باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده در این مقاله با نتایج مرجع اخیر مشاهده میشود میزان تصحیح در فاصله ۶ سانتی متری تقریباً یکسان است. البته قدرت چشمه مورد استفاده در مقاله مرجع ذکر شده ۹ میکروکوری می‌باشد (۲ میکروکوری بیشتر از مقاله حاضر).

۵. نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های موثر در بدست آوردن زمان ظهور پالس در ویوفورم استفاده از فیلتر میانگین است. بعد از دسته‌بندی و جداسازی تمامی پالس‌های موجود در ویوفورم، با استفاده از برازش غیر خطی، تابع مدل جدید بر پالس‌های تجربی برازش شد. با کسر سهم دم پالس قبلی از پالس بعدی، تصحیح اثر مخرب رخدادهای انباشت در قدرت تفکیک انرژی انجام شد. قدرت تفکیک انرژی بصورت موثری بهبود یافت.

۶. تشکر و قدردانی

تشکر صمیمانه خود را از مسئول آزمایشگاه هسته‌ای گروه فیزیک دانشگاه تبریز، جناب آقای رضا هاشم‌زاده، اظهار می‌نمایم.

¹³ Tail Extrapolation

¹⁴ Calibration



مراجع

۱. Mantero, J., et al., Application of gamma-ray spectrometry in a NORM industry for its radiometrical characterization. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015. 116: p. 78-81.
۲. Kinahan, P.E. and J.S. Karp, Position estimation and error correction in a 2D position-sensitive NaI (TI) detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1990. 299(1-3): p. 484-489.
۳. Buzzetti, S., et al., High-speed FPGA-based pulse-height analyzer for high resolution X-ray spectroscopy. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005. 52(4): p. 854-860.
۴. Huang, Q. and J. Jiang, A Radiation-Tolerant Wireless Monitoring System Using a Redundant Architecture and Diversified Commercial Off-the-Shelf Components. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018. 65(9): p. 2582-2592.
۵. Di Fulvio, A., et al., Digital pulse processing for NaI (TI) detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016. 806: p. 169-174.
۶. Mohammadian-Behbahani, M.-R. and S. Saramad, Pile-up correction algorithm based on successive integration for high count rate medical imaging and radiation spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018. 897: p. 1-7.
۷. Knoll, G.F., *Radiation detection and measurement*. 2010: John Wiley & Sons.
۸. Xiao, W., et al., A new pulse model for NaI (TI) detection systems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014. 763: p. 170-173.
۹. Chevillard, S., The functions erf and erfc computed with arbitrary precision and explicit error bounds. *Information and Computation*, 2012. 216: p. 72-95.