DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-07

УДК 004.93:004.94

Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів

Рева Сергій Миколайович
к.т.н., доцент кафедри ЕіУС; факультету комп'ютерних наук; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: iec-lab@karazin.ua
https://orcid.org/0000-0002-2615-9226

Цибліев Денис Олександрович
аспірант Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: dtsibliev@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-4373-8773

Технологія комп'ютерної обробки та аналізу даних, отриманих в процесі вимірювання енергетичних спектрів рентгенівського та гамма-випромінювання, поступово витісняє класичні аналогові методи вимірювання. Проте існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого методу комп'ютерного аналізу, оскільки через випадковість процесів під час реальних експериментів немає можливості отримання еталонних даних. Можливим способом вирішення цієї проблеми є комп'ютерне моделювання штучного спектрометричного сигналу із заздалегідь відомими параметрами, який надасть можливість визначити вірогідність розпізнавання сигналів детектора тим чи іншим методом математичної та логічної обробки.

Метою даної роботи є розробка математичних моделей та алгоритмів комп'ютерного моделювання сигналів із наперед відомими параметрами та дослідження можливості їх використання в подальшому для оцінки ефективності комп'ютерних методів розпізнавання та аналізу цих сигналів.

Стаття розглядає два різні **методи** синтезу цифрового образу спектрометричного сигналу з потрібним розподілом амплітуд імпульсів на основі попередньо завантаженого шаблону — табличної функції розподілу амплітуд.

Перший підхід базується на використані статистичних методів та відрізків ймовірностей для визначення амплітуд імпульсів в процесі створення цифрового образу сигналу. Він дозволяє моделювати хід експерименту, поступово формуючи сигнал, в якому розподіл амплітуд завжди наближений до заданого. В основі другого підходу комп'ютерного моделювання покладено використання детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів у створюваному сигналі. Цей підхід дозволяє при випадковому розподілі імпульсів у часі отримати точний цифровий образ сигналу, що не містить статистичних відхилень від шаблону. Але на відміну від першого, даний метод дає необхідний результат лише при закінченні всього сеансу комп'ютерного моделювання експерименту.

В роботі наведено деякі **результати** моделювання, які отримані при проведенні чисельних експериментів за допомогою комп'ютерної програми, що розробляється в рамках дослідження. Показано, що при моделюванні першим методом з використанням експериментально отриманого спектру або штучно створеного ідеалізованого шаблону, результуючий спектр містить статистичні відхилення, однак функція розподілу амплітуд в цілому відповідає табличній функції, вказаній у шаблоні.

Описані підходи та алгоритми моделювання можуть бути **використані** для створення цифрових образів сигналів з повністю визначеними вхідними даними для подальшої перевірки ефективності роботи комп'ютерних методів розпізнавання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів.

Ключові слова: *комп'ютерне моделювання, імітаційне моделювання, комп'ютерні методи аналізу, математичні моделі, спектрометричні сигнали.*

Як цитувати: Рева С. М., Цибліев Д. О. Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. вип. 58. С.64-74.
https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-07

How to quote: S.M. Reva, D.O. Tsybliyev, "Рева С. М., Цибліев Д. О. "Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals " *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp.64-74, 2023. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-07

© Рева С. М., Цибліев Д. О., 2023
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

1 Вступ. Мета та актуальність дослідження

Останні десятки років, на противагу класичним методам спектрального аналізу рентгенівського та гамма-випромінювання з використанням аналогової електроніки, інтенсивного розвитку набувають комп'ютерні методи реєстрації та вимірювання спектрів. В їх основу, як правило, покладено цифровий запис сигналів, що надходять безпосередньо з детекторів рентгенівського та гамма-випромінювання, з їх послідуючою комп'ютерною обробкою та аналізом. Для того, щоб отримати цифрові дані, використовується спеціальне обладнання, що зазвичай включає в себе: детектор випромінювання (сцинтиляційний або напівпровідниковий) з відповідним пристроєм живлення, digitizer (оцифровувач сигналу), комп'ютер чи розподілену комп'ютерну систему збору і обробки даних і, звісно ж, саме джерело випромінювання. Приклад будови такої спектрометричної установки з використанням сцинтиляційного детектора показано на рисунку 1.1 [1].

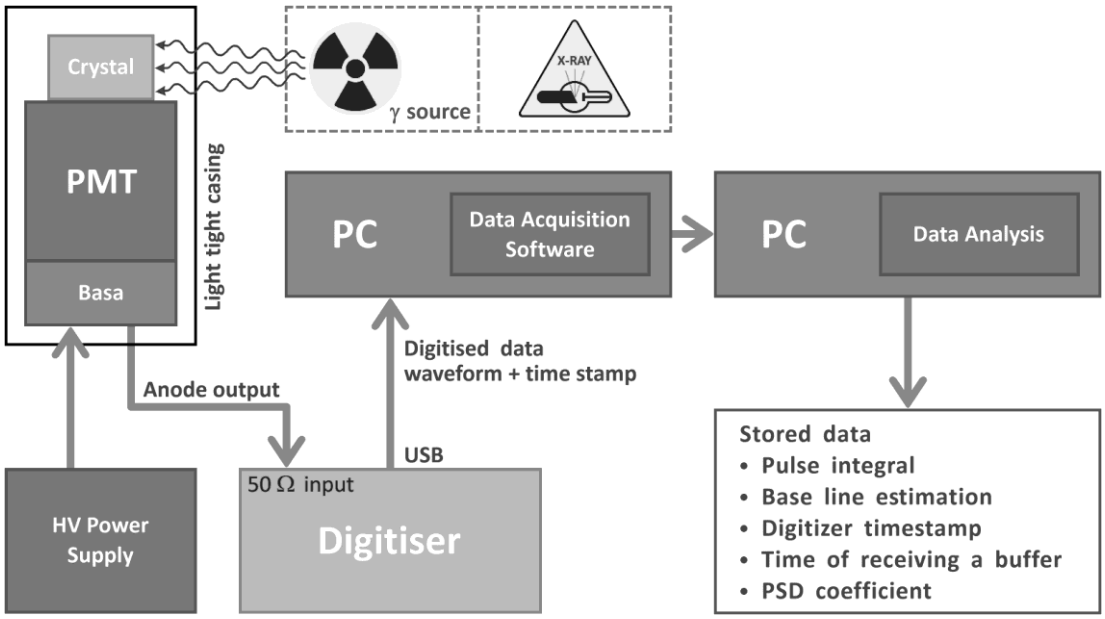


Рис. 1.1 Загальна схема установки для отримання та аналізу цифрових спектрометричних даних

Спектрометричний сигнал, що виробляється детектором, являє собою послідовність імпульсів, які формуються у випадкові моменти часу та мають різні амплітуди. Саме вони, а точніше — їх параметри, і несуть в собі закодовану корисну інформацію про матеріали і процеси, що досліджуються. Однак випадковий характер появи імпульсів часто призводить до їх взаємного накладання, в результаті чого змінюється їх амплітуда і тривалість, а це, в свою чергу, призводить до спотворення первинної інформації. Відновити її повністю методами аналогової спектрометрії практично неможливо, тобто, результуючий спектр завжди має певні похибки.

На відміну від аналогових методів вимірювання, в яких обробка сигналу здійснюється виключно апаратними засобами (частотними фільтрами, інтегруючими та диференціюючими каскадами і т. п.), комп'ютерний аналіз не лише надає можливість використання математичних методів обробки попередньо оцифрованого сигналу, але і можливість його логічного аналізу з метою відновлення частково втраченої інформації, що може поліпшити достовірність отриманого кінцевого результату.

Однак існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого комп'ютерного методу обробки, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних даних. Процеси на вході спектрометричного вимірювального тракту завжди є випадковими та непередбачуваними в деталях. Це унеможливлює порівняння результатів, отриманих внаслідок комп'ютерної обробки цифрового сигналу, з реальною послідовністю подій, які зареєстрував детектор.

Вирішити цю проблему можливо шляхом комп'ютерного моделювання штучного спектрометричного сигналу, який потім буде використовуватися для дослідження методів математичної та логічної обробки. Адже в цьому разі для всіх створених випадковим чином імпульсів буде відомим точний час генерації та їх електричні параметри. Це дозволить порівняти

вхідні та вихідні дані для конкретних умов чисельного експерименту, а також розрахувати на основі цього порівняння *ймовірності отримання достовірних даних*. Саме цей параметр може бути використаний як критерій ефективності того чи іншого методу комп'ютерної обробки спектрометричного сигналу.

У попередній статті [2] було описано механізм комп'ютерного моделювання сигналу детектора з випадковими величинами амплітуд імпульсів і, відповідно, випадковим амплітудним спектром. Приклад синтезованого імпульсного сигналу зображено на рисунку 1.2. Проте більш актуальною є задача моделювання випадкової за часом послідовності сигналів згідно із наперед визначеним законом розподілу амплітуд, що є характерним для певного реального джерела випромінювання. Така модель буде краще відповідати цифровим даним, які отримуються на реальних експериментальних установках. Окрім того, це дасть можливість проведення чисельних експериментів з деякими ідеалізованими функціями розподілу амплітуд для більш детального та глибинного дослідження методів комп'ютерної обробки даних.

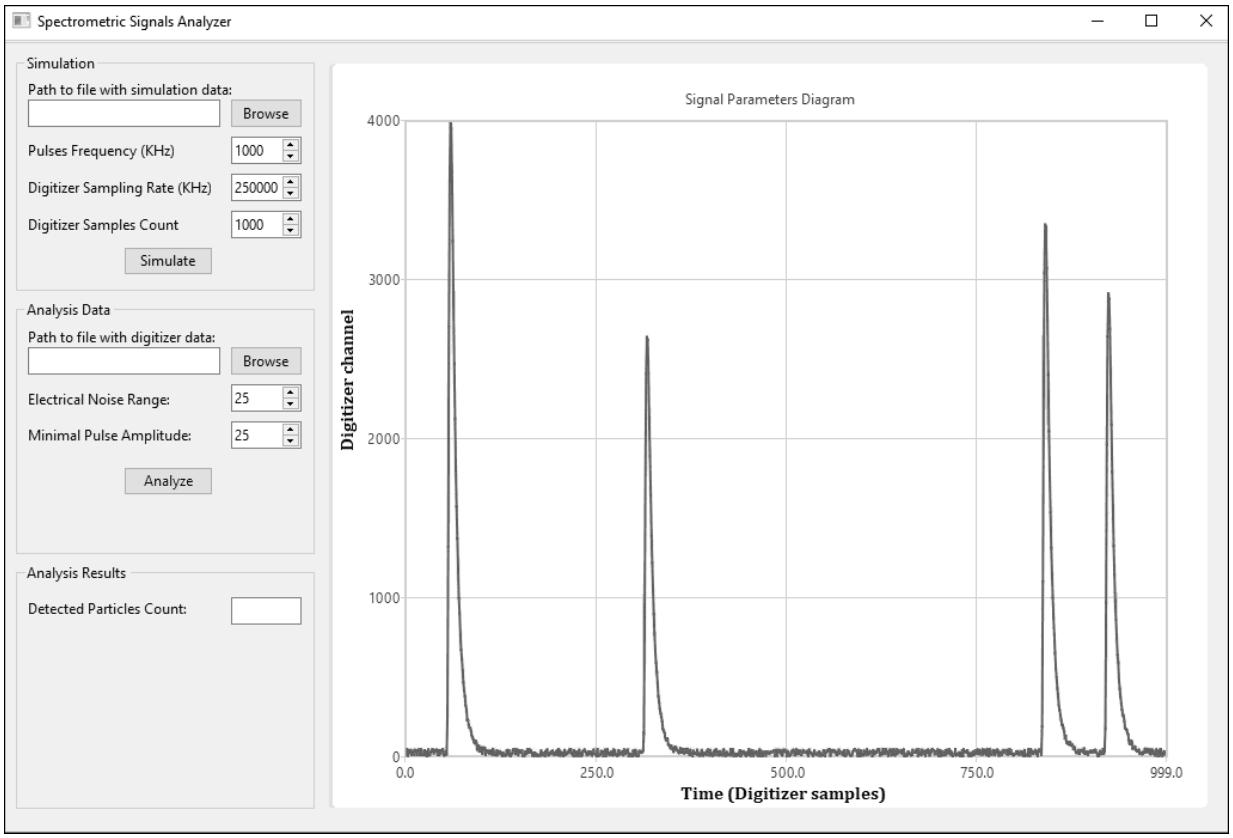


Рис. 1.2 Форма імпульсних сигналів, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання

Метою даного дослідження є розробка комп'ютерних моделей та алгоритмів генерації цифрових спектрометричних сигналів із заданими параметрами та дослідження можливості їх використання для оцінки ефективності математичних та алгоритмічних методів розпізнавання та аналізу цих сигналів.

2 Програмні засоби. Підготовка даних для моделювання згідно заданого шаблону

В рамках дослідження розробляється додаток для комп'ютерного моделювання (симуляції) даних [3], які за форматом відповідають вихідним даним digitizer-a, що отримуються під час проведення експериментів. Програма надає можливість симулювати наближений до реального сигнал з попередньо вказаним законом розподілу амплітуд імпульсів або завантажити дані, отримані експериментально за допомогою digitizer-a. Додаток також дозволяє аналізувати ці дані з метою розпізнавання реальних або промодельованих подій, використовуючи різні алгоритмічні підходи, а також візуалізувати отримані результати у вигляді числових параметрів, часових діаграм сигналів та гістограм спектрів, побудованих на основі проведеного аналізу.

Додаток розробляється на мові програмування C++ [4] з використанням бібліотеки QT [5]. Дана бібліотека дозволяє створювати кросплатформне програмне забезпечення і надає можливість компіляції та запуску додатку під Unix-подібними операційними системами або операційною системою Windows.

Для симуляції даних, що наближені до реальних експериментів, програма передбачає можливість завантаження файлів-шаблонів, записаних раніше за допомогою спектрометричної апаратури. Вони являють собою табличні функції розподілу енергій (амплітуд імпульсів) і є чисельним представленням тих чи інших енергетичних спектрів. З цією метою за необхідності можна також застосовувати і спеціально створені (ідеалізовані) функції розподілу. Під час створення додатку у якості шаблонів використовувалися файли спектрів, отримані за допомогою 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що входить до складу гамма-спектрометра з аналоговим каналом обробки спектрометричного сигналу. На рисунку 2.1 можна побачити спектр випромінювання ^{137}Cs з домішками Pb, який побудований на основі завантажених в програму експериментальних даних. На осі X виведені номери каналів АЦП (від 0 до 4095), а вісь Y відображає кількість зареєстрованих в цих каналах імпульсів з відповідною амплітудою. Програма також підраховує і виводить загальну кількість зареєстрованих під час експерименту імпульсних сигналів. Наприклад, для завантаженого файлу це значення дорівнює 2 236 424 250. Наступним кроком роботи додатку є комп'ютерне моделювання сигналу детектора, який міститиме в собі вказану кількість імпульсів або певну їх частину (50%, 10%, тощо) з випадковим розподілом у часі та розподілом амплітуд, що відповідає саме цьому завантаженому спектру.

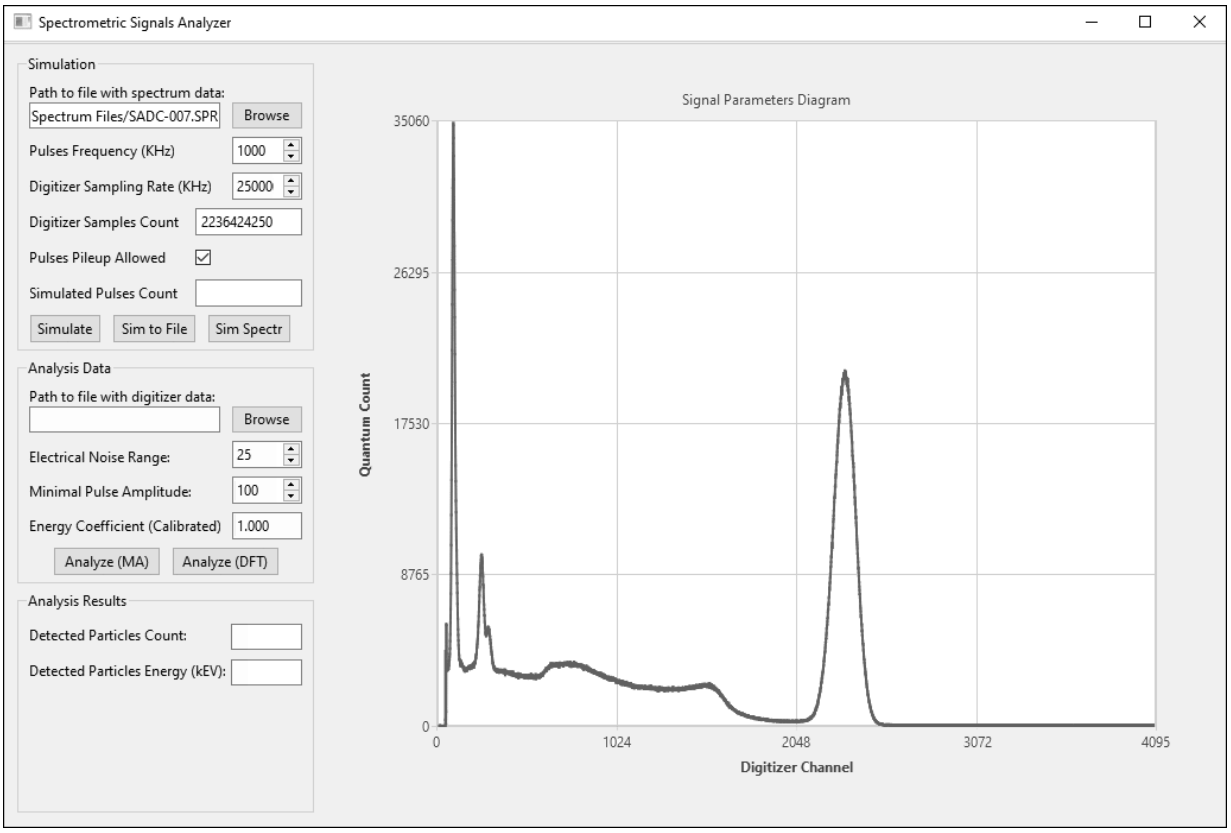


Рис. 2.1 Візуалізація даних завантаженого файлу спектру-шаблону

В інтерфейсі комп'ютерної програми для моделювання окремих імпульсів сцинтиляційного детектора є можливість вказати наступні налаштування чисельного експерименту:

- інтенсивність генерації імпульсів — середня кількість імпульсів за секунду (Average pulses count per sec), цей параметр ще називають рівнем завантаження детектора;
- тривалість експерименту, що моделюється, в секундах (Experiment duration);
- рівень електричного шуму, що накладається на сигнал (Electrical Noise Range).

Загальна кількість імпульсів L, які мають бути змодельовані, обчислюється за формулою 2.1:

$$L = APC \times ED, \tag{2.1}$$

де APC – середня кількість імпульсів за секунду, ED – тривалість експерименту в секундах.

Повністю змодельована форма сигналу реєстрації квантів гамма-випромінювання у дискретному вигляді може бути представлена формулою 2.2 [6]:

$$s_i = z_i + n_i + \sum_{j=0}^{L} A_j p(i - t_j), \tag{2.2}$$

де i – порядковий номер дискретного кадру з digitizer, s – значення сигналу, z – константа або дуже повільні зміни в часі порівняно до компоненти ширини імпульсу сигналу; n – компонента шуму, що накладається на сигнал, L – число зареєстрованих імпульсів, A_j та t_j є амплітудою та часом реєстрації імпульсу j, $p(t)$ – форма імпульсу, що згенерована одним зареєстрованим квантом (більш детально описана в статтях [6, 7]).

Для того, щоб змоделювати імпульсні сигнали згідно з потрібним законом розподілу амплітуд, значення амплітуд A_j мають корелюватися із завантаженим спектром-шаблоном. У наступних розділах статті більш детально розглядаються два підходи моделювання, які були реалізовані в ході дослідження і дозволяють досягти цієї мети.

3 Моделювання з використанням відрізків ймовірностей розподілу амплітуд

Перший підхід для імітаційного моделювання згідно заданого шаблону базується на статистичних методах та використанні відрізків ймовірностей розподілу амплітуд імпульсів модельованого сигналу. Спочатку формується масив відрізків ймовірностей потрапляння амплітуди імпульсу в певний діапазон згідно завантаженого файлу-шаблону. Оскільки такий файл містить фіксовану кількість N каналів та кількість зареєстрованих електронікою імпульсів в кожному каналі, то взявши за основу весь відрізок ймовірності шириною від 0 до 1, ми розбиваємо його на N відрізків, що відповідають ймовірності потрапляння значення амплітуди імпульсу в кожен канал відповідно. Ширина відрізку ймовірності для конкретного каналу обчислюється за формулою 3.1:

$$wp_i = C_i / TC \tag{3.1}$$

де wp_i – ширина відрізку ймовірності для значення амплітуди імпульсу A_j, що відповідає і-му каналу; C_i – кількість імпульсів зареєстрованих на і-му каналі в шаблоні; TC – загальна кількість зареєстрованих імпульсів у завантаженому файлі-шаблоні на всіх каналах.

В програмному алгоритмі відрізки ймовірностей зберігаються у відсортованому масиві як пари чисел (початкове, кінцеве значення ймовірності). Також була реалізована функція, яка ефективно виконує бінарний пошук [8] в даному масиві відрізку ймовірності, в який потрапляє згенероване випадкове число R. Далі в алгоритмі моделювання ми створюємо масив із L імпульсів (кількість обчислена згідно формули 2.1) з поки невизначеними амплітудами, проте час появи кожного імпульсу t_j встановлюється випадковим чином в діапазоні часу експерименту за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом [3, 9]. Відсортовуємо даний масив за часом появи імпульсів та починаємо моделювання цифрового сигналу використовуючи формулу 2.2, при цьому амплітуда A_j кожного імпульсу встановлюється таким чином, що генерується випадкове число R в діапазоні від 0 до 1 за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом та залежно від того, у відрізок ймовірності якого каналу wp_i потрапляє це випадкове число R, береться значення амплітуди імпульсу A_j, яке відповідає цьому каналу (рис. 3.1). Оскільки час появи імпульсу генерується випадковим чином, то імпульси можуть накладатися один на одного, формуючи так званий pile-up ефект.

Таким чином, чим більше було зареєстровано імпульсів на певному каналі у завантаженому шаблоні, тим ширше буде діапазон ймовірності потрапляння в цей канал, і тим більше змодельованих імпульсів матимуть амплітуду, яка відповідає саме цьому каналу. В процесі моделювання і генерації випадкових чисел розподіл амплітуд змодельованих імпульсів буде наближатися до завантаженого шаблонного розподілу.

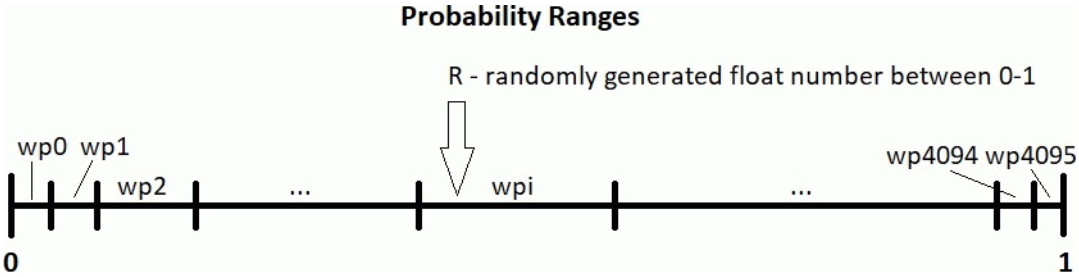


Рис. 3.1 Схематичне зображення відрізків ймовірностей вибору значень амплітуд модельованих імпульсів згідно завантаженого шаблону

На рисунку 3.2 зображено результат комп'ютерного моделювання цим методом зі встановленим часом експерименту, що відповідає генерації близько 50% загальної кількості імпульсів, передбачених файлом-шаблоном. Діаграма D1 візуалізує завантажений шаблонний розподіл, а також розподіл амплітуд змодельованих імпульсів. Як бачимо, крива розподілу амплітуд синтезованого сигналу відтворює форму шаблону. Проте ця лінія проходить наполовину нижче, оскільки загальна кількість імпульсів практично зменшена вдвічі.

Діаграма D2 візуалізує лише частину часової діаграми синтезованого сигналу, так як загальна кількість згенерованих імпульсів є дуже великою і становить більше одного мільярда.

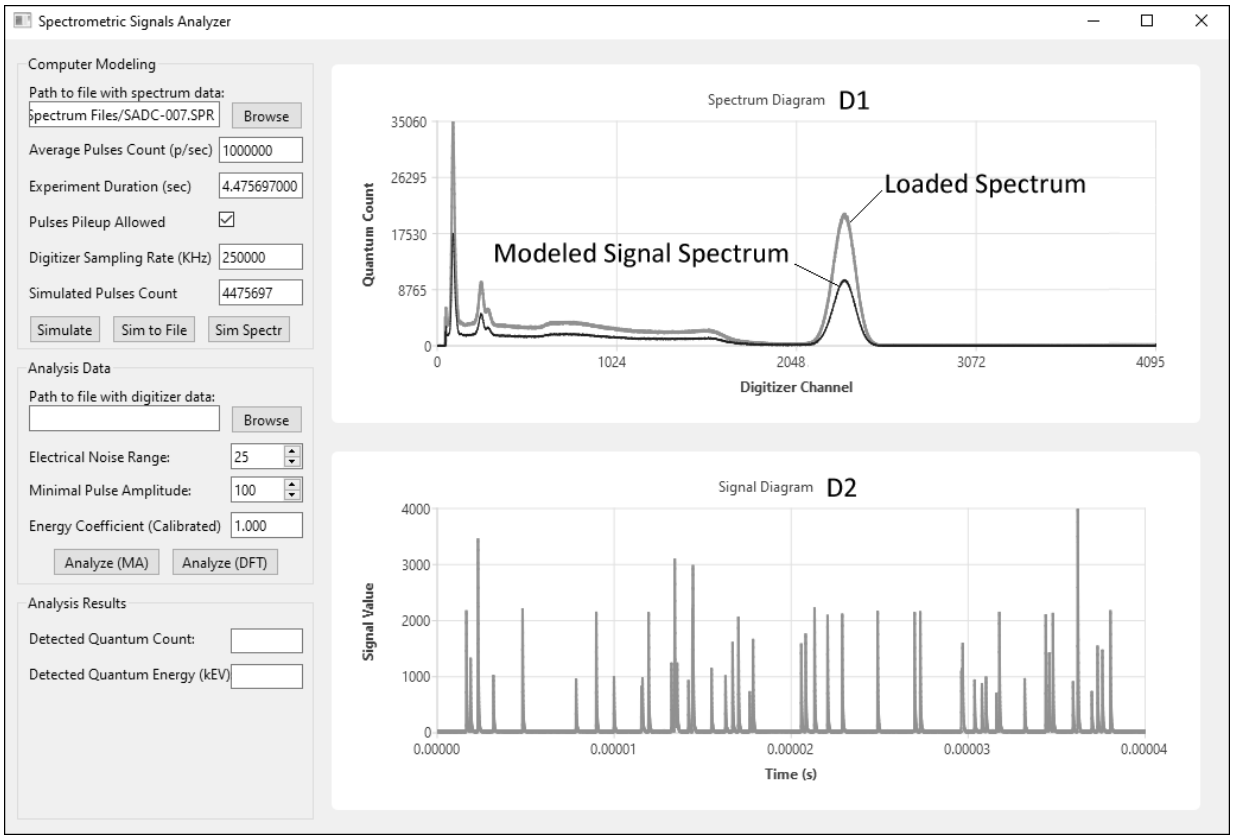


Рис. 3.2 Результат комп'ютерного моделювання 50% імпульсів алгоритмом з використанням відрізків ймовірностей згідно файлу-шаблону з розподілом як у реального джерела випромінювання

Також для додаткового дослідження цього підходу було проаналізовано комп'ютерне моделювання згідно штучно створеного лінійного розподілу. Тобто такого випадку розподілу, коли на кожному каналі є однакова кількість зареєстрованих імпульсів і такий завантажений файл-шаблон на діаграмі являє собою рівну горизонтальну лінію. Був підготовлений спеціальний файл з однаковою кількістю зареєстрованих імпульсів на кожному з N каналів рівною 1000. Далі цей файл був завантажений в програмі і також був запущений процес моделювання з встановленим часом експерименту, щоб змоделювати 50% від загальної кількості

імпульсів у завантаженому шаблоні. Результати моделювання згідно лінійного розподілу відображені на рисунку 3.3. На діаграмі D1 цього рисунку можна побачити, що розподіл амплітуд змодельованих імпульсів не являє собою рівну горизонтальну лінію, а є наближений до неї в середньому, проте є певні відхилення. Це пояснюється тим, що моделювання амплітуд здійснюється випадковим чином за допомогою генератора випадкових чисел і може мати статистичні відхилення. При збільшенні часу експерименту і, відповідно, кількості імпульсів, що моделюються, розподіл їх амплітуд буде наближатися до лінійного. Тобто, в цілому описаний алгоритм дозволяє моделювати хід реального експерименту. В кожний момент часу розподіл амплітуд імпульсів змодельованого сигналу буде в певній мірі відтворювати завантажений шаблон, а зі збільшенням кількості змодельованих імпульсів (та часу експерименту) — все більше наближатися до завантаженого спектру. Проте для досягнення, наприклад, повністю лінійного розподілу амплітуд краще використовувати підхід, описаний у наступному розділі.

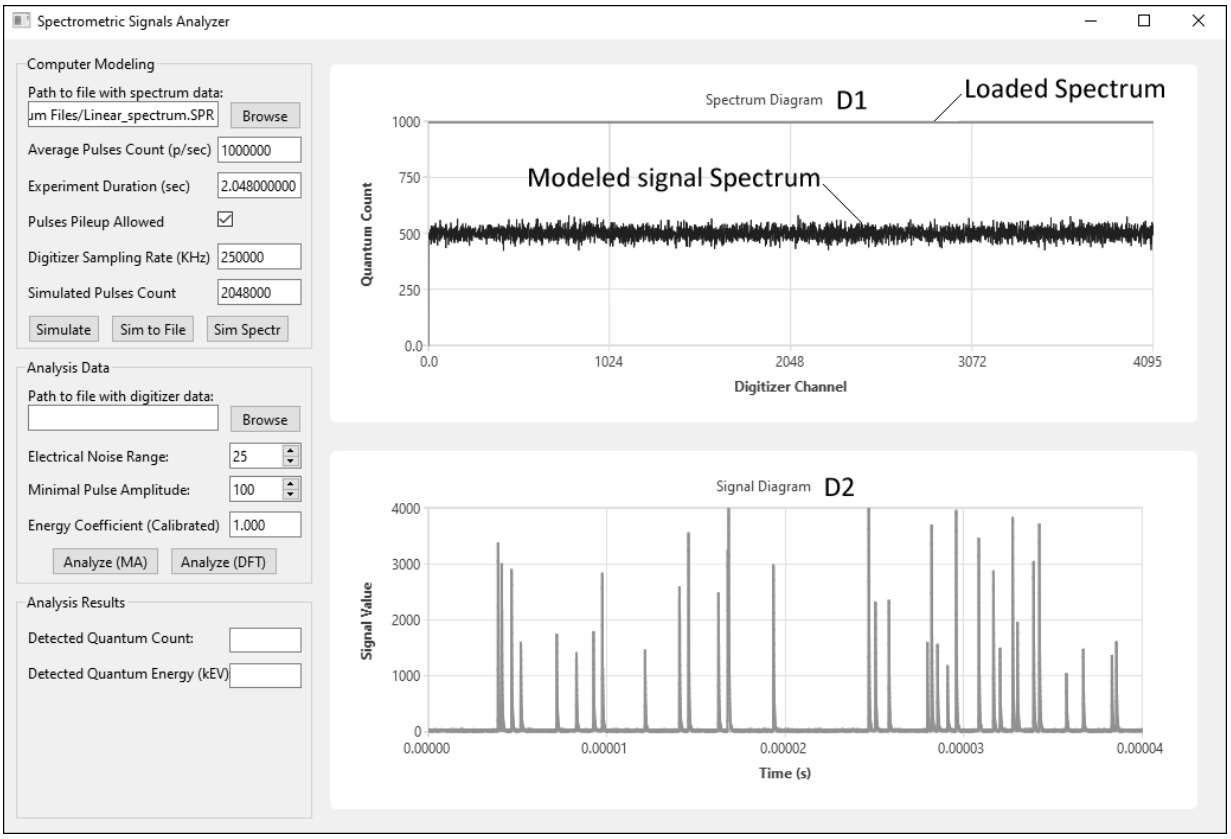


Рис. 3.3 Результат комп'ютерного моделювання 50% імпульсів алгоритмом з використанням відрізків ймовірностей згідно шаблону з лінійним розподілом

4 Моделювання на основі детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд

Даний підхід комп'ютерного моделювання базується на тому, що у завантаженому шаблоні нам відома кількість зареєстрованих імпульсів в кожному з N каналів та загальна кількість імпульсів у всіх каналах. Виставляючи час експерименту та моделюючи певну кількість імпульсів L, що вказана у відсотках від загальної кількості (100%, 50%, 10%, тощо), ми можемо у відповідності із завантаженим шаблоном відразу вирахувати кінцеву кількість змодельованих імпульсів, що мають мати амплітуди Aj за формулою 4.1:

$$CA_j = (L / TC) \times C_j \qquad (4.1)$$

де CA_j – кількість імпульсів з амплітудою A_j що відповідає каналу j; L - загальна кількість імпульсів, що має бути змодельована (обчислюється за формулою 2.1); TC – загальна кількість зареєстрованих імпульсів у завантаженому файлі-шаблоні на всіх каналах; C_j – кількість зареєстрованих імпульсів на каналі j у завантаженому шаблоні.

Враховуючи це, ми можемо в алгоритмі програми попередньо сформувати масив із N елементів, кожен із яких міститиме кількість імпульсів CA_j, що у підсумку мають бути змодельовані, та їх амплітуди A_j. Такий масив для 4096 каналів схематично зображений на рисунку 4.1.

Channel number:	0	1	2	...	...	4094	4095
Modeled quantum pulses count:	**CA_0**	**CA_1**	**CA_2**	**...**	**...**	**CA_{4094}**	**CA_{4095}**
Amplitude that corresponds to channel:	**A_0**	**A_1**	**A_2**	**...**	**...**	**A_{4094}**	**A_{4095}**

Рис. 4.1 Сформований масив кінцевого розподілу амплітуд імпульсів модельованого сигналу

Далі в алгоритмі моделювання ми в циклі беремо кожен елемент масиву і формуємо задану кількість імпульсів сигналу CA_j з відповідною амплітудою, проте час появи кожного імпульсу t_j визначається за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом в діапазоні всього часу експерименту. Відсортовуємо імпульси за часом появи і моделюємо цифровий сигнал згідно формули 2.2. Таким чином, наприкінці процесу моделювання ми отримаємо образ сигналу, в якому розподіл амплітуд імпульсів повністю відповідає файлу-шаблону. Слід зауважити, що цей підхід дає необхідний результат, лише коли експеримент моделюється від початку і до кінця. Саме під час моделювання розподіл амплітуд імпульсів буде сильно відрізнятися від завантаженого спектру-шаблону на відміну від підходу, описаного у розділі 3, коли в будь який момент часу форма спектру змодельованого сигналу в цілому відповідає шаблону.

На діаграмі D1 рисунку 4.2 показано результуючий спектр сигналу, отриманого з використанням другого методу при генерації 50% імпульсів, передбачених шаблоном з лінійним розподілом амплітуд.

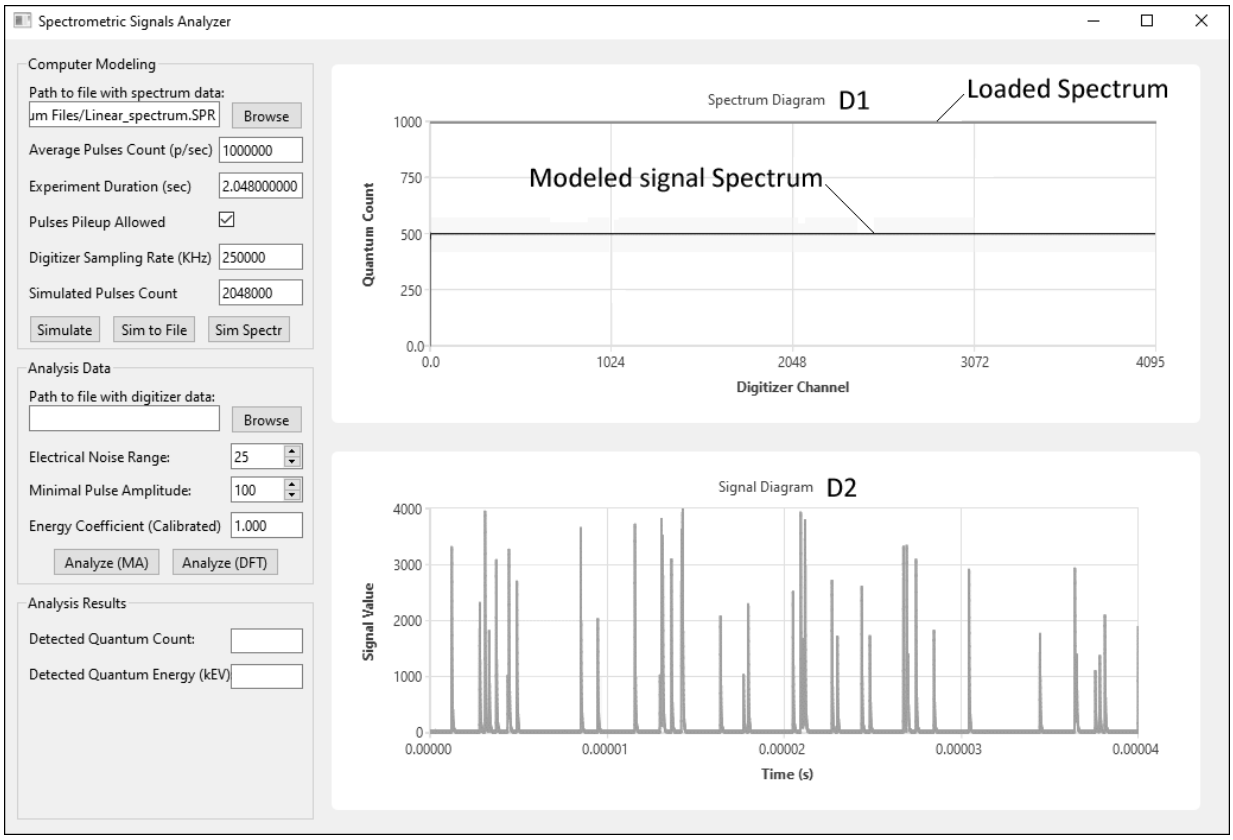


Рис. 4.2 Результат моделювання 50% імпульсів другим методом згідно шаблону з лінійним розподілом амплітуд

Таким чином, даний підхід моделювання у підсумку не містить статистичних відхилень розподілу і має краще підійти для перевірки роботи комп'ютерних методів аналізу, розпізнавання та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів.

5 Висновки та напрямки для подальших досліджень

У даній статті було описано математичні моделі та два різні алгоритми для комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону, які були реалізовані в ході цього дослідження.

Перший підхід базується на використанні статистичних методів, в основі яких формування необхідного розподілу амплітуд здійснюється шляхом управління ймовірністю виникнення імпульсів потрібної амплітуди. Для цього в алгоритмічній моделі генератора випадкових подій застосовуються відрізки ймовірностей, довжина яких пропорційна кількості імпульсів, що зафіксовані в тому чи іншому каналі спектру-шаблону. Цей підхід дозволяє послідовно моделювати весь хід експерименту, поступово формуючи у реальному часі спектральний сигнал із вказаним законом розподілу амплітуд. Це наближає чисельний експеримент до реального із застосуванням того чи іншого джерела випромінювання. При зупинці процесу моделювання в довільний момент часу отримані вихідні дані будуть в певній мірі відповідати завантаженому файлу-шаблону. Випадковий розподіл амплітуд в межах одного каналу може бути реалізований шляхом комп'ютерної генерації та додавання шумового сигналу з певними параметрами.

Проте при дослідженні даного методу синтезу спектрометричного сигналу з використанням штучно створеного шаблону з лінійним спектром, було виявлено певні закономірні статистичні відхилення від лінійного розподілу. Вони зумовлені випадковим характером процесу моделювання. Це може дещо ускладнити в деяких випадках використання цього методу для оцінки достовірності розпізнавання імпульсів у складі спектрометричного сигналу при використанні тих чи інших методів комп'ютерної обробки та аналізу.

Другий метод моделювання базується на використанні детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів. Такий підхід в підсумку дозволив змоделювати сигнал згідно завантаженого файлу-шаблону з даними, що в точності відповідають спектру реального джерела випромінювання без будь-яких статистичних відхилень. Особливістю даного способу моделювання є те, що правильний розподіл ми отримуємо лише в кінці процесу моделювання, а в ході процесу розподіл амплітуд імпульсів буде сильно відрізнятися від заданого (на відміну від першого підходу).

В подальшому дослідженні планується використати описані моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання для генерації вхідних даних, які потрібні для перевірки ефективності роботи існуючих комп'ютерних алгоритмів і методів розпізнавання, аналізу та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів, а також для створення нових, більш ефективних методів.

Також можливим є подальше вдосконалення як самих розроблених комп'ютерних моделей для синтезу цифрових образів спектрометричних сигналів, так і методів візуалізації графічної інформації, отриманої з їх допомогою.

ЛІТЕРАТУРА

1. W. Wolszczak, P. Dorenbos. Time-resolved gamma spectroscopy of single events. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2018. Volume 886. P. 30–55. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900217315036 (дата звернення: 28.12.2023)
2. Рева С., Циблієв Д. Комп'ютерні методи розпізнавання та аналізу параметрів рентгенівського і гамма-випромінювання. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2022. Том 55, 38-48. URL: https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/22593 (дата звернення: 28.12.2023)
3. Averill M. Law, W. David Kelton. Simulation Modeling and Analysis. Third edition. McGraw-Hill. 2000. 760 pages.

4. Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Addison-Wesley. 2013. 1346 pages.
5. QT Framework Official Website. URL: https://www.qt.io/product/framework (дата звернення: 28.12.2023)
6. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2020. Volume 997. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051 (дата звернення: 28.12.2023)
7. A.E. Shevelev, et al., High performance gamma-ray spectrometer for runaway electron studies on the FT-2 tokamak, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2016. Volume 830. P. 102–108. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900216304685 (дата звернення: 28.12.2023)
8. Adam Drozdek. Data Structures and Algorithms in C++. Second Edition. Brooks/Cole. 2001. 650 pages.
9. Стеценко І.В. Моделювання систем: навчальний посібник. М-во освіти і науки України, Черкаський державний технологічний університет. Черкаси. 2010. 399 с.

REFERENCES

1. W. Wolszczak, P. Dorenbos. Time-resolved gamma spectroscopy of single events. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. Volume 886. P. 30–55. 2018. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900217315036 (Last accessed: 28.12.2023)
2. Reva, S., & Tsybliyev, D. Computer methods of recognition and analysis of X-ray and gamma radiation parameters. Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems». 2022. Volume 55. P. 38-48. https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/22593 (Last accessed: 28.12.2023) [in Ukrainian]
3. Averill M. Law, W. David Kelton. Simulation Modeling and Analysis. Third edition. McGraw-Hill. 760 pages. 2000.
4. Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Addison-Wesley. 2013. 1346 pages.
5. QT Framework Official Website. URL: https://www.qt.io/product/framework (Last accessed: 28.12.2023)
6. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. Volume 997. 2020. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051 (Last accessed: 28.12.2023)
7. A.E. Shevelev, et al., High performance gamma-ray spectrometer for runaway electron studies on the FT-2 tokamak, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. Volume 830. P. 102–108. 2016. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900216304685 (Last accessed: 25.12.2022)
8. Adam Drozdek. Data Structures and Algorithms in C++. Second Edition. Brooks/Cole. 2001. 650 pages.
9. I. V. Stetsenko. *Systems modeling: textbook*. Cherkasy: CSTU, 2010, 399 p. [in Ukrainian]

Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals

Reva Sergiy *Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Electronics and Control Systems; Faculty of Computer Science; V. N. Karazin National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022*
e-mail: iec-lab@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0002-2615-9226

Tsybliyev Denys *PhD student V.N. Karazin National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022*
e-mail: dtsibliev@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-4373-8773

The technology of computer processing and analysis of data obtained in the process of measuring the energy spectra of X-ray and gamma radiation is gradually replacing the classic analog measurement methods. However, there is a problem of objective evaluation of the effectiveness of different computer analysis methods. Because obtaining reference data is not possible due to the randomness of processes during real experiments. A possible way to solve this problem is computer modeling of an artificial spectrometric signal with known parameters. This will provide an opportunity to determine the probability of detecting detector signals by different methods of mathematical and logical processing.

The purpose of this work is to develop mathematical models and algorithms for computer modeling of signals with known parameters and investigate the possibility of their use to evaluate the effectiveness of computer methods of recognition and analysis of these signals.

The article considers two different **methods** of synthesizing a digital image of a spectrometric signal with the required distribution of pulse amplitudes based on a preloaded template - a tabular function of amplitude distribution.

The first approach is based on the use of statistical methods and probability ranges for determining pulse amplitudes in the process of digital signal image creation. It allows you to simulate the process of the experiment, gradually forming a signal in which the distribution of amplitudes is always close to the given one. The basis of the second computer modeling approach is the use of deterministic final values of pulse amplitudes distribution in the generated signal. This approach makes it possible to obtain an accurate digital image of the signal with a random distribution of pulses in time, which does not contain statistical deviations from the template. But unlike the first, this method gives the required result only after the end of the entire session of computer modeling of the experiment.

The article presents some modeling **results** obtained during numerical experiments based on a computer program developed as a part of the research. When modeling by the first method using an experimentally obtained spectrum or an artificially created idealized template, it is shown that the resulting spectrum contains statistical deviations. But the amplitude distribution function generally corresponds to the tabular function specified in the template.

The described approaches and modeling algorithms can be **used** to create digital images of signals with fully defined input data to further test the effectiveness of computer-based methods of spectrometric signal parameters recognition and analysis.

Keywords: *computer modeling, simulation modeling, computer analysis methods, mathematical models, spectrometric signals.*

Надійшла у першій редакції 27.03.2023, в останній - 29.04.2023.
The first version has been received on 27.03.2023, the final version - on 29.04.2023.