

Електронні системи та сигнали

УДК 539.1.074

Розробка оптимальної конструкції системи візуалізації гамма-випромінювання

Махньов О. І.,

e-mail cropemail@gmail.comФакультет електроніки fel.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—У даній статті проводиться огляд існуючих способів візуалізації гамма-поля, їх недоліків та переваг. Розглянуто такі способи, як: системи з рухливими детекторами, колімованими детекторами, кодовою апертурою та обертальною модуляцією. Виходячи із огляду вироблено пропозицію оптимального рішення для даного типу системи. Пропозиція охоплює створення одновимірної системи кодової апертури з модифікованою рівномірно-надлишковою матрицею масивів, сцинтиляційними детекторами та системою збору даних на основі FPGA.

Ключові слова — гамма-випромінювання; візуалізація поля; гамма-телескоп.

I. ВСТУП

З моменту відкриття рентгенівське і гамма-випромінювання знайшли широке застосування в науці, техніці, промисловості та медицині. Значне число практичних застосувань цих випромінювань пов'язане з їх проникаючою здатністю, тобто зі здатністю проходити через щільну речовину, не вступаючи з нею у взаємодію. Ця властивість дозволила застосувати гамма-випромінювання для спостереження внутрішньої структури оптично непрозорих об'єктів і процесів, що відбуваються в них. Загальновідомо використання рентгенівського і гамма-випромінювань для діагностики захворювань у медицині і для дефектоскопії матеріалів і виробів у промисловості.

Успішне застосування нових методів досліджень та діагностики стає можливим тільки з розвитком методів і розробкою нових методів візуалізації гамма і рентгенівського випромінювання. Візуалізація охоплює детектування і комп'ютерну обробку лічильної і спектральної інформації про випромінювання з метою отримання його оптичного уявлення, а також вивчення структури джерела випромінювання.

Завдання візуалізації поля гамма-випромінювання виникло також з необхідності моніторингу навколишнього середовища в зв'язку з поширенням штучних джерел радіації, що викликане некоректним поводженням з ними в промисловості, виробуваннями ядерної зброї, застосуванням у ядерній енергетиці матеріалів, що діляться, а також радіаційними аваріями. У даний час розробляються

методи, що дозволяють вивчати розподіл поля гамма-випромінювання. Ці методи також можуть бути застосовані для дистанційного виявлення джерел іонізуючих випромінювань.

II. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГАММА-ПОЛЯ

У даному розділі виконаємо короткий огляд кожної групи, визначимо їх недоліки та переваги.

Існуючі методи візуалізації гамма-поля поділяють на 5 фундаментально різних груп [1]:

- 1) Системи з рухливими детекторами (Directional imagers).
- 2) Системи із колімованими детекторами (Collimator-based imagers).
- 3) Системи із кодовою апертурою (Coded aperture imagers).
- 4) Системи із обертальною модуляцією (Rotation modulation imagers).
- 5) Системи з рухливими детекторами.

Системи з рухливими детекторами використовують принцип підрахунку потужності дози випромінювання як функцію часу чи просторової координати. Цей спосіб візуалізації є широко-прийнятим методом радіаційно-геологічних та радіаційно-екологічних досліджень. Типове використання методу – аеро-гамма-зйомка (рис. 1) – встановлення детекторів на літаку чи гвинтокрилі та обліт досліджуваної області.



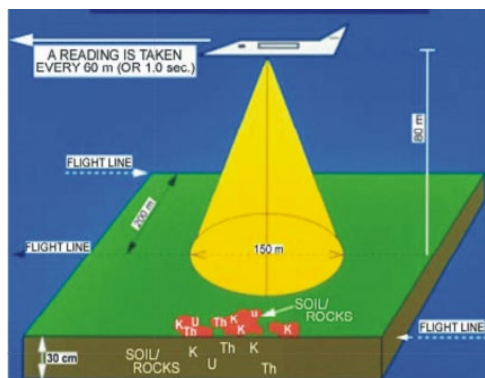


Рис. 1 Принцип аеро-гамма-зйомки

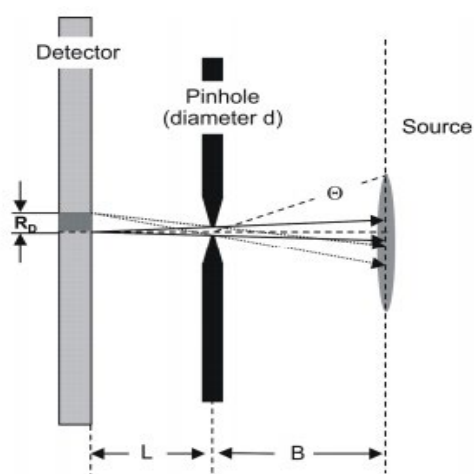


Рис. 2 Схема системи із камерою-обскурою

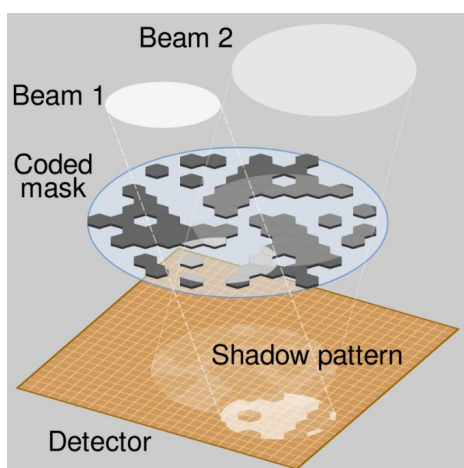


Рис. 3 – Система з кодовою апертурою

Не зважаючи на те, що цей метод є широко прийнятним, його використання часто є неможливим. Наприклад, в умовах необхідності високої просторової роздільної здатності чи при дослідженні забудованих областей. Також, даний метод прийнятний лише для джерел високої активності та потребує значних об'ємів чутливих елементів, окрім очевид-

них затрат на використання літальних апаратів чи інших транспортних засобів.

6) Системи із колімованими детекторами

Цей та наступні методи візуалізації відносять до так званих «Справжніх систем візуалізації» (True Gamma-Ray Imagers), так як вони надають дані із значно більшою просторовою роздільною здатністю.

У якості чутливого елемента для таких систем використовують так звані Позиційно-Чутливі Детектори (ПЧД) – матриці чи масиви із окремих детекторів випромінювання або неперервні кристали скінтіляторів із системою реєстрації положення спалахів.

Класичним прикладом системи візуалізації із колімованим детектором є камера-обскура. На шляху ПЧД монтується екран із невеликим отвором. Зображення досліджуваної області проєктується на ПЧД. В залежності від відстані екрану до ПЧД зображення досліджуваного об'єкту або збільшується на детекторі, або зменшується. Схема такої системи наведена на рис. 2.

Серед переваг такої системи можна навести простоту будови та алгоритмів обробки даних, а також можливість простої зміни конструкції для перероблення її з телескопа у мікроскоп та навпаки.

7) Системи із кодовою апертурою

Принцип кодової апертури вперше запропонували у 1968 році Дике та Абельс. У своїй роботі вони запропонували використовувати екран із великою кількістю отворів, що пропускали б більше випромінювання на ПЧД та дозволяли б накопичувати необхідну кількість даних за значно коротший час. Схема такої системи наведена на рис. 3.

Процес обробки даних, що зібрані із ПЧД у такій системі являє собою пошук рисунку тіні від екрану у зібраних показах, що зводиться до виконання операції згортання між масивом показів та рисунком екрану.

Такі системи знайшли широке використання – вони монтуються на космічну техніку, на їх основі будуються системи для радіологічних досліджень, віддаленої локалізації джерел випромінювання, дослідження роботи радіофізичних установок, тощо.

Перевагами такої системи є значно зменшений час накопичення даних та відносна простота побудови. Також зберігається можливість перетворення системи із телескопа у мікроскоп та навпаки. До недоліків можна віднести дещо ускладнений процес обробки даних.

8) Системи із обертальною модуляцією

Система із обертальною модуляцією складається із двох наборів паралельних решіток з екрануючого матеріалу (рис. 4).

Обидва набори обертаються разом перед детектором, модулюючи випромінювання, що на нього потрапляє. Таким чином, рівень

випромінювання є залежним від куту потрапляння у систему та від поточного куту обертання сіток.

Такі системи знайшли використання лише на космічній та висотній науковій техніці, через свою відносну простоту та низьку вагу – для роботи потребується лише один не-позиційно-чутливий детектор. Також такі системи дозволяють досягати високих показників за просторовою роздільною здатністю.

До недоліків можна віднести складність алгоритмів обробки даних.

III. РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Розробку запропонованої системи візуалізації гамма-випромінювання варто почати із вибору її області роботи. Із поширенням ядерних технологій та необхідністю віддаленої локалізації джерел (наприклад, при їх високій активності) має сенс обрати нішу наземної переносної техніки.

З наведеного вище огляду оптимальним рішенням для наземної техніки є система із кодовою апертурою. Для спрощення та поліпшення економічних властивостей системи варто обрати одномірний ПЧД, на який буде відкидати тінь одномірний екран.

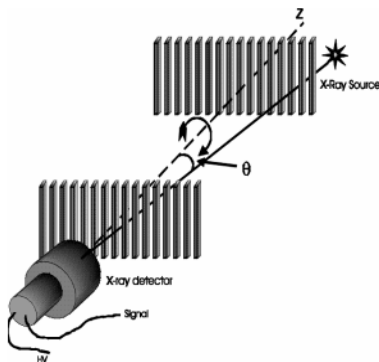


Рис. 4 Система із обертальною модуляцією

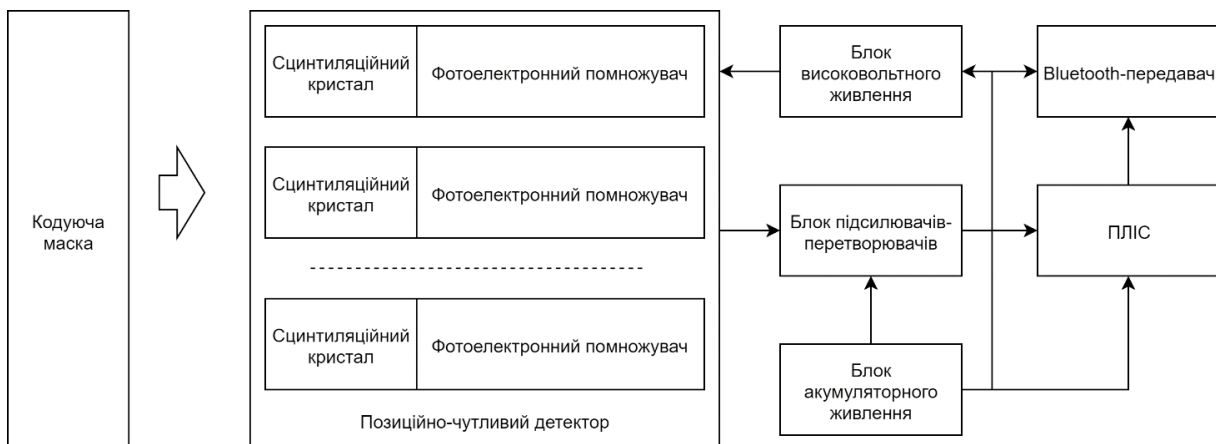


Рис. 5 Блок-схема пристрою, що пропонується

Функціональна схема запропонованого пристрою наведена на рис. 5. Розглянемо детальніше його принцип роботи та основні вимоги до конструкції.

Випромінювання від джерела, що досліджується, проходить скрізь екран із свинцевих (або інших, біль щільних) прутів (також називається маскою), під час чого відбувається його кодування. Кодоване випромінювання потрапляє на масив датчиків випромінювання – сцинтиляційних збірок.

Сцинтиляційна збірка складається із кристалу сцинтилятора та фотоелектронного помножувача та працює наступним чином: у кристал потрапляє гамма-квант та викликає слабкий спалах світла. Світло потрапляє на фотокатод фотоелектронного помножувача та викликає фотоелектронну емісію. Вибиті з фотокатоду електрони помножуються та викликають імпульс струму на аноді помножувача. Площа під кривою цього імпульсу характеризує яскравість спалаху світла, що відповідає енергії гамма-кванту, що потрапив у кристал.

Масив таких детекторів називається позиційно-чутливим детектором. Таким чином, на позиційно-чутливому детекторі з'являється тінь від кодувальної маски.

Сцинтиляційні детектори обрані через свою високу чутливість та можливість отримання інформації про спектр випромінювання від джерела, за допомогою якої виконанням операції кореляції над спектротричною інформацією та рисунком маски можливе розділення та визначення типів нуклідів у полі зору [3].

Для роботи позиційно-чутливого детектору потрібен відносно потужний блок високовольтного живлення.

У системах із кодовою апертурою важливим є рисунок маски. У подібних системах часто використовуються рисунок, що відповідає рівномірно-надлишковому масиву (рис. 6).

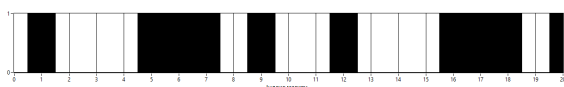


Рис. 6 – Маска, створена за рівномірно-надлишковим масивом

Такі маски мають декілька корисних властивостей: результат виконання операції автокореляції над ними є дельта-функцією. Це визначає те, що результат виконання кореляційної операції між рисунком маски та показами буде однозначно визначати напрям на джерело випромінювання.

Також маска, створена за рівномірно-надлишковим масивом, при обертанні навколо центру практично повністю перетворюється у анти-маску – екран із інверсією відкритих та закритих комірок. Тому має сенс додати у систему можливість розгортання екрану навколо вертикальної осі – електроприводом чи оператором.

За допомогою виконання вимірювання одного й того ж об'єкту крізь маску та анти-маску можна компенсувати нерівномірність фонового опромінення детекторів, а також нерівномірність їх чутливості [3].

Для отримання двовимірних зображень система може бути розвернута навколо повздовжньої осі на 90 градусів із наступним автоматичним співставленням отриманих даних.

Варто відмітити, що будь-які щільні об'єкти, що опиняються між досліджуваним об'єктом та джерелом випромінювання призводять до появи на позиційно-чутливому детекторі додаткових тіней. Це явище називається паразитним кодуванням та може призвести до значного спотворення результатів вимірів. Для уникнення цього явища на механічну конструкцію пристрою накладається вимога рівномірності радіаційної прозорості для діапазону гамма-випромінювання джерел, що найбільш часто зустрічаються у природі та промисловості.

Сигнали з окремих помножувачів потрапляють на багатоканальний блок підсилювачів-перетворювачів. Цей блок фільтрує та перетворює сигнал із струму у напругу та надає інформацію гамма-кванти, що потрапляє у детектор.

У даному блоці потрібно передбачити можливість індивідуального налаштування підсилення кожного з каналів для компенсації нерівномірності показів кожного з детекторів. Нерівномірність пока-

зів викликана різницею світлового ходу кристалів сцинтиляторів та різницею підсилення помножувачів.

Інформація з блоку підсилювачів потрапляє на мікросхему програмованої логіки (ПЛІС). Саме такий апаратний спосіб обробки обраний через можливість забезпечення повної незалежності каналів реєстрації імпульсів та для мінімізації часу нечутливості системи, що може бути викликаний часом, що витрачається на обробку імпульсів, у, наприклад, мікропроцесорних системах.

ПЛІС передає інформацію на Bluetooth-передавач, що передає її на персональний комп'ютер користувача. Використання Bluetooth обумовлено можливістю створення автономної системи, що зменшить дозу випромінювання оператору (що зможе знаходитись далі від системи під час виміру, без необхідності прокладки кабелів) та високим ступенем захисту апаратної реалізації протоколу від завад.

Так як система автономна, для живлення її потрібний блок акумуляторного живлення.

ВИСНОВКИ

Запропоновано систему візуалізації гамма-поля, виконану за схемою гамма-телескопу із одновимірною кодуваною апертурою. Запропонована конструкція виконана виходячи з потреб отримання неспотвореного зображення поля, мінімізації часу виміру, економічності ефективності, передбачає ефекти паразитного кодування та виконана на сучасній приладовій та схемотехнічній базі.

Має сенс виконати роботу з реалізації макетного зразка системи для перевірки технічних рішень та початку работ над промисловим зразком.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] K. Vetter, L. Mihailescu, K. Nelson, J. Valentine, D. Wright, «Gamma-ray Imaging Methods», Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 2006 DOI: [10.1016/j.nima.2017.08.040](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.040)
- [2] L. Caballero, F. Albiol Colomer, A. Corbi Bellot, P. Olleros Rodríguez, J. Agramunt Ros, C. Domingo-Pardo, J.L. Leganés Nieto, P. Contreras and D.L. Pérez Magán, «Gamma-ray imaging system for real-time measurements in nuclear waste characterization», Instituto de Física Corpuscular - CSIC - University of Valencia, Valencia, 2018 DOI: [10.1088/1748-0221/13/03/P03016](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/03/P03016)
- [3] Makhnyov I., Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po teme "Razrabotka metodov i sredstv distancionnoy lokalizatsiy I spectrometrii istochnikov gamma-izlucheniya" (shifr "Diana"), Academy of Sciences, USSR, Interdepartmental Engineering Center "Planeta", 1991

Разработка оптимальной конструкции системы визуализации гамма-излучения

Махнёв А. И.,

e-mail cropemail@gmail.com

Факультет электроники fel.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—В данной статье проводится обзор существующих способов визуализации гамма-поля, их недостатков и преимуществ. Рассмотрены такие способы, как: системы с подвижными детекторами, коллимированными детекторами, кодированной апертурой и вращательной модуляцией. Исходя из обзора выдвигается предложение оптимального решения для данного типа системы. Предложение охватывает создание одномерной системы кодированной апертурой с модифицированной равномерно-избыточной матрицей массивов, сцинтилляционными детекторами и системой сбора данных на основе FPGA.

Ключевые слова — гамма-излучение; визуализация поля; гамма-телескоп.

Development of the Optimal Gamma-Ray Imaging System Design

O. I. Makhnov,

e-mail cropemail@gmail.com

Faculty of Electronics fel.kpi.ua

National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute» kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—This article covers solutions in the field of the gamma-ray imaging systems, as well as proposes an optimal solution for design of such system.

Gamma-ray imaging systems are proving their utility as a useful tool for radio-ecological research, investigation of isotope mishandling, nuclear incidents liquidation and so on. They allow viewing gamma-ray fields as if they were visible. For example, this kind of system is capable of pointing to radiation sources on top of video stream, which allows localization of radiation sources without the need of getting close to them with a dosimeter.

Overview of the existing solutions covers directional imagers, collimator-based imagers, coded aperture imagers and rotation modulation systems. Each section of this paragraph outlines main advantages and disadvantages of the given solution.

Based on a solution overview, a proposition of an optimal solution for this kind of system is made. Proposition covers a creation of the one-dimensional coded aperture system with modified uniformly-redundant array mask, scintillation detectors and FPGA-based data acquisition system. This kind of system uses a thick screen, also called mask, with holes. This screen casts a gamma-ray shadow onto an array of detectors. Then a data acquisition system is used to run a correlation algorithm, which finds a shadow pattern in detector's readouts. This allows determining from what angle this shadow has been cast. The mask is formed by a modified uniformly-redundant array pattern to minimize the chance of incorrect correlation algorithm result and to use its ability to turn coded aperture into an inverse one. Performing measurements with and inverse mask allows compensation for irregular background radiation and irregularity between detector sensitivity in the array of sensors. It should also be noted, that using of such ability requires to physically turn the mask around its vertical axis.

This paragraph outlines a number of design principles and requirements, such as avoidance of irregularities in radiation transparency of the mechanical construction, benefits of making the whole system remotely operated, overall requirements for supply and readout electronics and a proposal to use programmable logic integrated circuits as a data acquisition measure. This section also covers possible steps to improve system performance, via turning it around vertical axle, rotation of the viewing frame to create 2-dimensional images and performing correlation algorithm on the spectral data to distinguish different nuclides amongst gamma-ray sources.

Overall conclusions of this article suggests an implementation of the test device to verify and field-test proposed technical solutions and to promote further research and development in this field.

Key words – gamma-radiation; imaging.

