

УДК 621

Методика математичного моделювання КМОП- та ПЗС-сенсорів зображення

Старинська А.Й., к.т.н. Терлецький О.В.

Завдання, що вирішуються в процесі проектування складних радіотехнічних систем, визначають вибір методу моделювання об'єкту проектування, алгоритмів і програм аналізу математичної моделі, критеріїв оцінки результатів моделювання і так далі. Методи моделювання компонентів і вузлів радіоелектронної апаратури досить добре вивчені і описані в літературі. Проте, специфіка функціонування КМОП- і ПЗС- сенсорів зображення в СТЗ не дозволяє використати вже існуючі методи для побудови математичних моделей приладів цього типу, придатних для вирішення завдань функціонального і схемо-технічного проектування СТЗ. Це перешкоджає використанню сучасних систем автоматизованого проектування РЭА при розробці СТЗ на основі твердотілих сенсорів зображення. Тому одним з основних питань автоматизації проектування СТЗ є розробка математичної моделі сенсорів зображення, яка б адекватно описувала процеси перетворення оптичного зображення в приладах цього типу з урахуванням амплітудних, просторових і шумових характеристик, а також режимів приладів даного типу.

Сенсор зображення, на відміну від інших компонентів електричних кіл (транзистори, резистори та інші), має розподілені параметри, тобто він сприймає не лише рівень сигналу (амплітудні характеристики), але і просторові характеристики елементів зображення. Крім того, для приладів цього типу характерні шуми, які обумовлені флуктуаційними процесами перетворення оптичного зображення в електричний сигнал і структурою фоточутливих елементів сенсорів зображення [1]. Слід зазначити, що рівень флуктуаційних шумів сенсорів зображення залежить від вибору режимів роботи приладів цього типу. Велика кількість чинників, що впливають на процес перетворення оптичного сигналу в КМОП- і ПЗС-сенсорах зображення, значно розширює коло завдань, що вирішуються на етапі математичного моделювання приладів цього типу [2]. Основними завданнями етапу функціонального моделювання твердотілого сенсора зображення є: визначення структури і алгоритму функціонування математичної моделі сенсора зображення, визначення параметрів її компонентів, врахування особливостей та параметрів режимів роботи сенсора, опис амплітудних, просторово-частотних та шумових

характеристик процесів перетворення сигналу в сенсорі зображення з урахуванням оптичної схеми проектування зображення на фото чутливу матрицю приладу. На

рис.1 представлена структурна схема етапів розробки математичної моделі сенсора зображення.

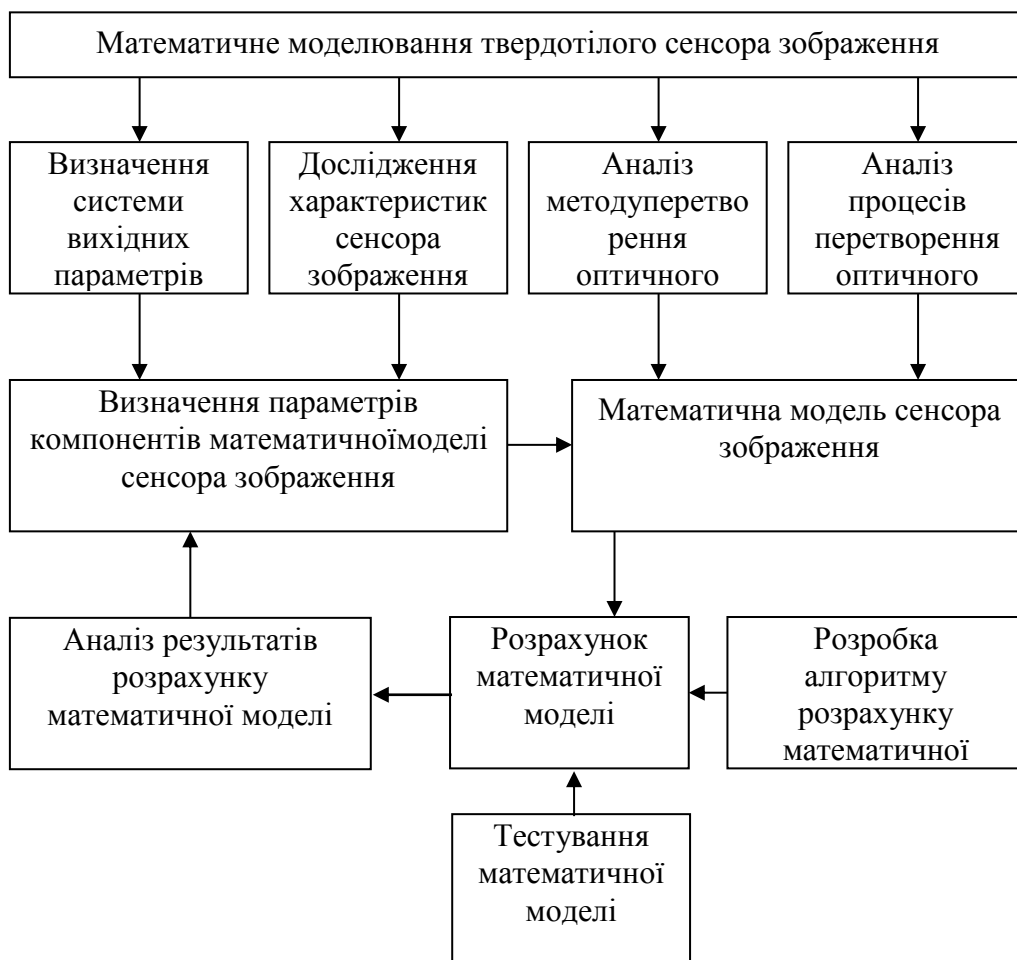


Рис.1. Структурна схема процесу математичного моделювання сенсорів зображення.

Побудова моделі сенсора розпочинається з постановки завдання моделювання. На цьому етапі залежно від вирішуваної задачі і відповідно до призначення моделі сенсора визначаються основні вимоги, що пред'являються до точності і складності моделі з урахуванням можливостей програмних обчислювальних засобів моделювання, вибирається

математичний опис процесу перетворення сигналу і режимів роботи сенсора зображення. Оскільки математична модель призначена для автоматизованого проектування систем технічного зору, то вибір режимів роботи сенсора здійснюється на основі принципу функціонування конкретної СТЗ, який визначається технічним завданням на її розробку.

Наступним етапом побудови математичної моделі є теоретичний аналіз і експериментальні дослідження процесу перетворення сигналу в сенсорі зображення. Цей етап включає наступні операції:

- визначення системи початкових параметрів математичної моделі. При цьому використовуються конструктивні параметри, паспортні дані, а також параметри, що характеризують вибраний метод перетворення оптичного сигналу;
- визначення і апроксимація основних амплітудних характеристик сенсора зображення. Апроксимуючі функції вибираються відповідно до заданої точності опису основних параметрів та характеристик сенсора зображення;
- аналіз методу перетворення оптичного сигналу в сенсорі зображення. Визначаються аналітичні вирази, що описують амплітудні та розподілені параметри процесу перетворення оптичного зображення;
- аналіз шумових характеристик процесів перетворення оптичного сигналу в сенсорі зображення.

Етап розробки математичної моделі сенсора зображення складається з трьох послідовних операцій: розробки алгоритму функціонування моделі, структурного синтезу моделі і визначення параметрів компонентів моделі. В

результаті цього етапу формується система нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь, що описує процеси перетворення оптичного сигналу в сенсорі зображення. Оскільки в реальному приладі взаємопов'язано протікають різні за своєю фізичною природою процеси, то алгоритм функціонування моделі встановлює певний взаємозв'язок між рівняннями і послідовністю розрахунку математичної моделі приладу.

У доповіді представлена методика опису амплітудних характеристик формування вихідного електричного сигналу сенсора зображення. Математична модель накопичування заряду в ПЗЗ-матриці та його наступне перетворення в напругу дає можливість розрахувати амплітуду вихідного електричного сигналу сенсора зображення в кожному пікселі сенсора в залежності від освітленості на кожному елементі оптичного зображення. Рівняння математичної моделі враховують квантову ефективність сенсора, яка чисельно визначає імовірність генерації електрона фотоном світла. Слід зазначити, що зазвичай квантова ефективність трактується відносно фотонів, що вже проникли в напівпровідник, а втрати в електродах описуються коефіцієнтом пропускання. У нашому випадку квантова ефективність розглядається узагальнено, тобто враховуються всі фотони, що потрапили на світлочутливий елемент сенсора зображення. Модель формування зображення у КМОН сенсорі має враховувати його просторові,

амплітудні та шумові характеристики. У результаті розрахунку моделі на виході отримаємо відгук датчика зображення на вхідний тестовий вплив, що заданий відповідно до параметрів робочої сцени з врахуванням просторової фільтрації оптичного сигналу. Окрім того, математична модель сенсора зображення повинна визначати відношення сигнал/шум вихідного сигналу сенсора зображення, що є одним з основних параметрів систем технічного зору.

Просторова фільтрація та методика визначення просторово-частотної характеристики процесу перетворення оптичного зображення в електричний відео сигнал описані у роботі [3]. КМОН та ПЗЗ сенсор зображення складається з упорядкованої матриці оптоелектронних елементів (пікселів). Всі пікселі мають ідентичні параметри та виконують однакову функцію по перетворенню оптичного сигналу в електричний вихідний сигнал. Тому для розрахунку відгуку математичної моделі в кожному пікселі сенсора на тестовий сигнал достатньо розрахувати амплітуду перетворення сигналу на кожному пікселі рядка телевізійного растру в залежності від його освітленості, а потім при формуванні відгуку сенсора на тестове зображення враховуються просторово-частотна та шумові характеристики сенсора зображення.

У доповіді приводиться методика врахування в математичній моделі параметрів сцени об'єкта спостереження, амплітудних,

просторових та шумових характеристик процесу перетворення оптичного зображення в КМОН- та ПЗС-сенсорах. Шуми в сенсорі зображення є адитивними і додаються до сигналу на різних етапах перетворення оптичного зображення. Оскільки шуми у сенсорі зображення залежать від режимів роботи та параметрів самого сигналу, то при моделюванні їх зручно розглядати поетапно в процесі перетворення сигналу. Тобто модель шумових та амплітудних характеристик розглядається разом. Для прикладу приведена загальна структура математичної моделі процесу перетворення сигналу в пікселі КМОН сенсора зображення, з врахуванням основних шумових складових. Оскільки генерація фотонів є випадковим процесом, то для кількісної оцінки значення отриманого сигналу використовуємо функції випадкової величини рис. 2.

Структурний шум для цієї моделі розраховується окремо і в модель пікселя не входить. Оскільки він викликаний неоднорідністю топології, то виникаючі спотворення сигналу варіюються окремо для кожного пікселя і є незмінними у часі та сталими відносно кадрів зображення. Методика моделювання перетворення сигналу у датчиках зображення, побудованих на КМОН та ПЗС сенсорах зображення дозволяє оцінити просторову фільтрацію сигналу та рівень спотворення зображення шумами, що виникають у каналі перетворення оптичного зображення.

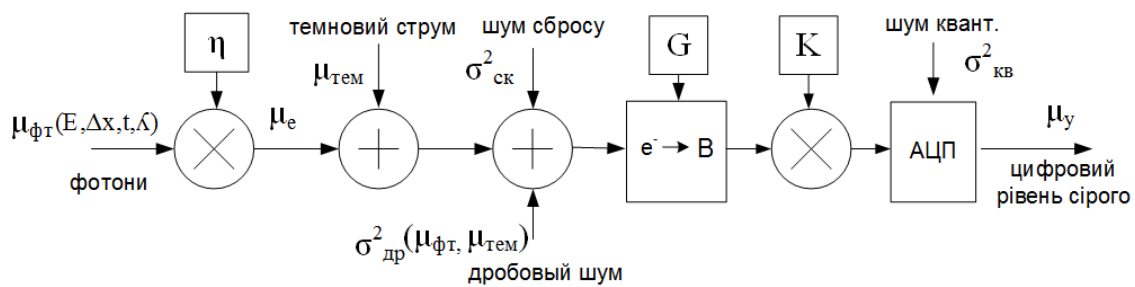


Рис.2. Структура математичної моделі пікселя КМОН - сенсора зображення: де, $\mu_{фт}$ - падаючі фотони, $\eta(\lambda)$ - квантовий вихід, Δx - площа пікселя, E - енергія випромінювання, λ - довжина хвилі випромінювання, t - час експозиції, μ_e - кількість генерованих фотонів, $\mu_{тем}$ - темновий сигнал, $\sigma_{ск}^2$ - шум скидання, $\sigma_{др}^2$ - дробовий шум, G - коефіцієнт перетворення, K - коефіцієнт підсилення, $\sigma_{кв}^2$ - шум квантування, μ_y - вихідний рівень сірого.

Представлена в доповіді математична модель сенсора зображення дозволяє на попередньому етапі проектування системи технічного зору отримати реакцію сенсора зображення на вхідний тестовий вплив, а також виходячи із вимог технічного завдання визначити необхідні параметри та режим роботи сенсора зображення, що значно спрощує проектування систем технічного зору, скорочує строки та витрати на їх розробку.

Література

1. HuiTianNoiseanalysisin CMOS imagesensors/HuiTian. -A dissertation, Stanforduniversity. - 2000. -101 p.
2. Яковлева В.С. Адаптивный видеодатчик с пространственно-временной фильтрацией на базе КМОП приемника излучения с активными пикселями: диссертация на соискание ученой степени: 05.13.05/ Яковлева Вера Сергеевна. - Курск, 2006. -113.
3. Starynska A., Terlecky O.Filtration of Optical Signal in Machine Vision Systems based on Solid-state Image Sensor/ A. Starynska, O. Terleckiy// IEEE 34th conference ELNANO-2014/National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute". - Kyiv, 2014. - p.341-344.