

АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СИНХРОННОЇ ОБРОБКИ ВІДЕОДАНИХ ЇХ ФІЛЬТРУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ НА БАЗІ УСТАНОВКИ З ДВОХ МАТРИЦЬ

А. Д. Тимофеев¹, Л. А. Держипольська²

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут фізики НАН України

Анотація

У роботі представлено технічну документацію програмно-апаратного комплексу DualCam, як універсального кросс-платформного програмного забезпечення. Описано схему установки, на якій проводилось тестування програмного забезпечення та виконувались заміри. Проведено огляд інструментів програми, таких як: налаштування установки (фокусування, підсилення, витримка); зведення камер методом афінного вирівнювання (ЕСС), або ручним методом по осях (6-DOF); робота з шумом, де було розібрано статистичну природу шуму на прикладі CMOS-сенсора, та методи їх просторово-часового придушення (EMA, MOG2, FusionCam, Bilateral Filter). Також оглянуто диференціальний аналіз із пороговим шумозаглушенням і нормалізацією, як інструмент візуалізації поляризаційних аномалій у режимі реального часу

Ключові слова: поляриметрія, PBS, CMOS-сенсор, ЕСС-алгоритм, EMA, MOG2, FusionCam, Bilateral Filter, диференціальний аналіз, Qt, OpenCV

Вступ

Програмно-апаратний комплекс DualCam розроблено як універсальне кроссплатформне програмне забезпечення для синхронного отримання та обробки відеопотоків з двох оптичних сенсорів. Реалізація на Qt 6 із використанням бібліотеки OpenCV [1] забезпечує єдину кодову базу для настільних систем (Windows, Linux) та вбудованих платформ (Raspberry Pi 5), що дозволяє використовувати той самий застосунок як на лабораторному ПК під час налагодження, так і на автономному вузлі польових вимірювань. Універсальність абстрактного шару захоплення (через бібліотеку libcamera на ARM-платформах та DirectShow/V4L2 на настільних системах) робить комплекс незалежним від конкретної моделі сенсора. Дана робота являє собою технічну документацію DualCam: розглянуто схему тестової установки, основні інструменти користувацького інтерфейсу та фізичний зміст закладених у програму алгоритмів обробки.

1. Схема тестової установки

Тестування програмного забезпечення та контрольні заміри проводилися на двоканальній поляриметричній установці зі спільним оптичним трактом (рис. 1). Зондувальне випромінювання від лазерного джерела спрямовується на досліджуваний об'єкт — розсіювач (на схемі — матовий екран); відбите від нього світло потрапляє у поляризаційний світлоді-

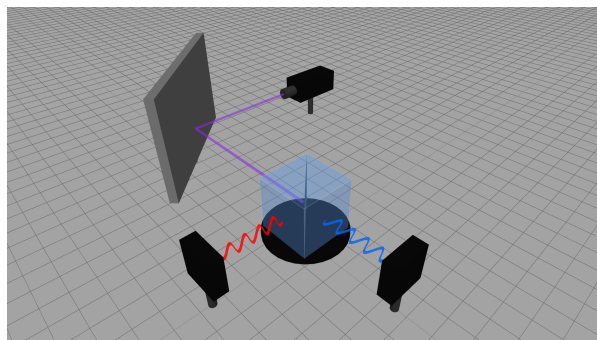


Рис. 1. Схема тестової поляриметричної установки: лазерне джерело, розсіювач (екран), поляризаційний світлодільний куб та дві CMOS-камери, що реєструють ортогонально поляризовані компоненти відбитого випромінювання.

льний куб (PBS), який розкладає вхідний потік на дві ортогональні лінійно поляризовані компоненти. Перша з них (умовно p -компонента) проходить крізь куб, друга (s -компонента) відбивається під прямим кутом. Кожна компонента реєструється окремою матрицею Sony IMX296 з глобальним затвором, синхронізованою за зовнішнім тригером.

Принциповою особливістю схеми є наявність спільного оптичного тракту: на відміну від стереозбору, тут відсутні стереобаза та паралакс, тож обидва сенсори «бачать» одну й ту саму ділянку об'єкта, а різниця між каналами визначається виключно поля-

ризаційним станом світла. Така геометрія є необхідною умовою для коректних вимірювань.

2. Інтерфейс програми та налаштування захоплення

При першому запуску DualCam відкривається у вихідному стані з двома порожніми областями попереднього перегляду (рис. 2). Верхня панель містить індикатор поточного режиму захоплення (роздільна здатність та частота кадрів), статусні маркери стану конвеєра обробки (IDLE/RUN, стан ECC) та кнопку доступу до архіву знімків. У нижній частині розміщені елементи керування захопленням — запуск/зупинка потоків, перемикач режимів відображення (одиночний канал/Dual) та кнопка фіксації кадру. Робоча область поділена на дві симетричні панелі для каналів Camera 1 та Camera 2 з можливістю плавного зміщення межі.

Після відкриття камер кожен канал отримує власну панель керування параметрами захоплення, що дозволяє налаштовувати їх незалежно. До основних параметрів належать:

- **Фокусування.** Підтримуються об'єктиви як з ручним, так і з електронно керованим фокусом; у режимі live-preview оператор може візуально оцінити різкість зображення на обох каналах одночасно.
- **Підсилення (gain).** Регулюється для детектування сигналів в більш екстремальних умовах, коли виділити потрібну інформацію від фону доволі складно. Збільшення підсилення підвищує яскравість зображення, проте лінійно посилює і шум зчитування, тому рекомендується обирати мінімальне значення, достатнє для уникнення недотриманої експозиції.
- **Витримка (exposure).** Визначає час інтегрування фотонів матрицею. Більша витримка покращує співвідношення сигнал/шум на низьких рівнях освітленості, проте обмежена вимогами реального часу та допустимим розмиттям рухомих об'єктів у кадрі.

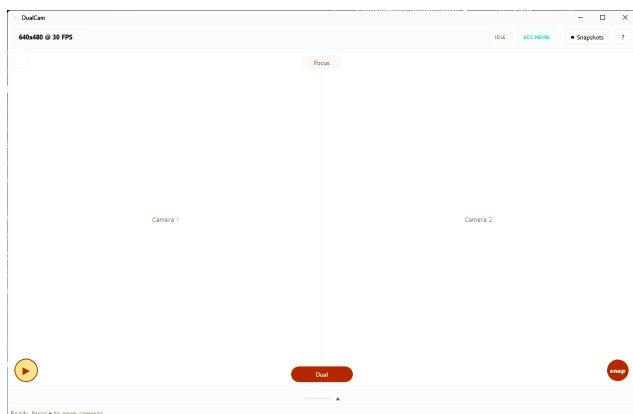


Рис. 2. Головне вікно DualCam одразу після запуску: дві порожні області попереднього перегляду каналів, елементи керування захопленням та індикатори стану обробки.

Можливість роздільного керування цими параметрами критично важлива для системи, де ці параметри регулюються автоматично, псууючи якість замірів

3. Зведення каналів

Незважаючи на спільний об'єктив, p - та s -компоненти PBS мають відмінні оптичні шляхи всередині куба, тому між зображеннями двох сенсорів спостерігаються залишковий зсув, поворот і незначна різниця масштабів. Без компенсації пряме попіксельне віднімання каналів дає паразитні граничні артефакти, що маскують реальні поляризаційні ефекти. Для усунення цієї проблеми у DualCam передбачено два режими зведення.

Автоматичне зведення (ECC). Реалізовано на основі максимізації коефіцієнта кореляції [2] — ітеративного алгоритму, що знаходить афінне перетворення (шість параметрів: дві компоненти зсуву, повороту, масштабу та скосу) між каналами. Алгоритм забезпечує субпіксельну точність порядку десятих часток пікселя, а вбудована внутрішня нормалізація робить його інваріантним до різниці яскравості між каналами. Це особливо важливо для PBS-системи, де поляризаційний склад сцени призводить до неоднакових інтенсивностей у двох плечах.

Ручне зведення (6-DOF). Для випадків, коли автоматичний алгоритм не сходиться (низькоконтрастна сцена, переважання спекл-структури), передбачено ручний режим із шістьма ступенями свободи: переміщення по двох осях, поворот, ізотропне та анізотропне масштабування, корекція скосу. Оператор отримує візуальний зворотний зв'язок у вигляді накладеної diff-маски і може довести зведення до бажаного рівня вручну. Отримана матриця перетворення зберігається і використовується далі у конвеєрі обробки.

4. Шуми CMOS-сенсора та їх придушення

Сигнал, що формується CMOS-матрицею, є випадковим процесом, у якому прийнято виокремлювати декілька статистично незалежних складових [3]. Перша — дробовий (фотонний) шум, що є фундаментальним обмеженням і визначається пуассонівською статистикою надходження фотонів: його середньоквадратичне відхилення зростає як корінь з кількості зареєстрованих електронів, тож на яскравих ділянках він домінує. Друга складова — шум зчитування, адитивний гаусівський компонент рівня кількох електронів, що вноситься підсилювачем та аналого-цифровим трактом і помітний насамперед у тінях. Третя — PRNU (*Photo-Response Non-Uniformity*) — мультиплікативна неоднорідність відгуку пікселів на рівні близько одного відсотка, зумовлена технологічним розкидом параметрів матриці. Для комплексного придушення цих складових у DualCam застосовано багаторівневу просторово-часову фільтрацію:

1. **ЕМА-усереднення.** Експоненційне ковзне середнє по послідовним кадрам зменшує випадко-

ву складову шуму у корінь-із- N разів від глибини буфера (типове значення — вісім кадрів дає приріст співвідношення сигнал/шум близько дев'яти децибел). Адаптивний детектор руху MOG2 [4] автоматично скидає буфер при виявленні динаміки в кадрі, що запобігає створенню артефактів (ghosting) рухомих об'єктів.

2. **Злиття каналів (FusionCam).** Покадрове усереднення двох вирівняних зображень. Завдяки статистичній незалежності шумів окремих сенсорів цей крок додає ще близько трьох децибел за SNR і частково компенсує PRNU обох матриць без необхідності проведення flat-field калібрування.
3. **Білатеральний фільтр [5]** виконує просторове згладжування спекл-структури у площині кадру, зберігаючи при цьому різкість поляризаційних меж завдяки одночасному ваговому ядру у просторовій та яскравісній областях.

Послідовне застосування цих фільтрів забезпечує сумарне підвищення співвідношення сигнал/шум приблизно на десяток-півтора децибел без помітної втрати просторової роздільної здатності.

5. Диференціальний аналіз

Центральним інструментом візуалізації у DualCam є піксельна абсолютна різниця двох вирівняних та очищених кадрів. Для неповності поляризованого джерела та ідеального PBS така різниця прямує до нуля, тож будь-яке стійке відхилення від нуля інтерпретується як прояв поляризаційної аномалії в сцені.

Порогове шумозаглушення. Усі значення diff-кадру, що не перевищують заданого оператором порогу, прирівнюються до нуля. Це дозволяє відсікти залишковий шумовий фон, який не вдалося подавити на попередніх етапах фільтрації. Поріг обирається оператором із зворотним зв'язком за гістограмою diff-кадру.

Нормалізація діапазону. До результату застосовується лінійне розтягування на повний динамічний діапазон 8-бітного зображення: мінімальне значення відображається у нуль, максимальне — у білий рівень, а проміжні — пропорційно. Завдяки цьому слабкий корисний сигнал стає видимим у повну силу. Для подальшої візуальної інтерпретації використовується термоподібна псевдокольорова палітра COLORMAP_JET, у якій навіть мікроскопічні поляризаційні ефекти стають відразу помітними оператору в режимі реального часу.

Висновки

Розглянуто технічну документацію кросплатформного програмно-апаратного комплексу DualCam: схе-

му двоканальної поляриметричної установки на базі спільного об'єктива, PBS та пари CMOS-матриць IMX296; інструменти налаштування параметрів захоплення (фокус, підсилення, витримка); процедури зведення каналів автоматичним ЕСС-алгоритмом та ручним способом із шістьма ступенями свободи; багаторівневу систему придушення шумів CMOS-сенсора (ЕМА, MOG2, FusionCam, білатеральний фільтр) і блок диференціального аналізу з пороговим шумозаглушенням та нормалізацією як засіб візуалізації поляризаційних аномалій у режимі реального часу. Поєднання універсальної програмної архітектури з фізично обґрунтованими алгоритмами обробки робить DualCam практичним інструментом для поляриметричних досліджень як у лабораторних, так і у польових умовах.

Перелік використаних джерел

1. *Bradski G.* The OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. — 2000. — Vol. 25, no. 11. — P. 120–126. — URL: <https://github.com/opencv/opencv/wiki/CiteOpenCV>.
2. *Evangelidis G. D., Psarakis E. Z.* Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2008. — Vol. 30, no. 10. — P. 1858–1865. — DOI: [10.1109/TPAMI.2008.113](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.113).
3. *Tian H.* Noise Analysis in CMOS Image Sensors : PhD thesis / Tian Hui. — Stanford University, 2000. — URL: https://isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_pub/hui_thesis.pdf.
4. *Zivkovic Z.* Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction // Proc. 17th Int. Conf. Pattern Recognition (ICPR). — Cambridge, UK, 2004. — P. 28–31. — DOI: [10.1109/ICPR.2004.1333992](https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.1333992).
5. *Tomasi C., Manduchi R.* Bilateral Filtering for Gray and Color Images // Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV). — Bombay, India, 1998. — P. 839–846. — DOI: [10.1109/ICCV.1998.710815](https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815).

Робота виконана в Інституті фізики НАН України згідно Ініціативної тематики МОНУ за темою: «Розробка та дослідження енергоефективних методів та лазерних джерел для дистанційного впливу лазерного випромінювання на рухомі об'єкти».