

УДК 521.9:004.932

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.7>

**Євген РЕХЛЕЦЬКИЙ**

доцент кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 ([rekhletskyuevgen@gmail.com](mailto:rekhletskyuevgen@gmail.com))

ORCID: 0000-0002-8879-4161

**Ірина АРТИЩУК**

кандидат економічних наук, доцент кафедри систем автоматизованого проектування, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Митрополита Андрія, 5, 4-й н.к., Львів, Україна, індекс 79000, доцент кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 ([irusia-13@ukr.net](mailto:irusia-13@ukr.net))

ORCID: 0000-0001-7287-8451

**Марія КРУТЯК**

старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 ([kmb55@lute.lviv.ua](mailto:kmb55@lute.lviv.ua))

ORCID: 0009-0000-8544-8733

**Леся ХМІЛЯРЧУК**

старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 ([\\_lkh@ukr.net](mailto:_lkh@ukr.net))

ORCID: 0000-0002-1753-6472

**Yevhen REHLETSKY**

Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 ([rekhletskyuevgen@gmail.com](mailto:rekhletskyuevgen@gmail.com))

**Iryna ARTYSHCHUK**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design, Lviv Polytechnic National University, 5 Mytropolyta Andreia str., Building 4, Lviv, Ukraine, postal code 79000; Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovsky str, Lviv, Ukraine, postal code 79005 ([irusia-13@ukr.net](mailto:irusia-13@ukr.net))

**Maria KRUTYAK**

senior lecturer of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 ([kmb55@lute.lviv.ua](mailto:kmb55@lute.lviv.ua))

**Lesya KHMILYARCHUK**

senior lecturer of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 ([\\_lkh@ukr.net](mailto:_lkh@ukr.net))

**Бібліографічний опис статті:** Рехлецький, Є., Артищук, І., Крутяк, М., Хмілярчук, Л. Удосконалення алгоритму обробки астрономічних зображень за допомогою методу Lucky Imaging. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 62–68. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.7>

**Bibliographic description of the article:** Rekhletskiy, E., Artyshchuk, I., Krutyak, M., Khmilyarchuk, L. (2023). Udoskonalennia alhorytmu obrobky astronomichnykh zobrazhen za dopomohoiu metodu Lucky Imaging [Improvement of the astronomical image processing algorithm using the Lucky Imaging method]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 62–68. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.7>

## УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ АСТРОНОМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ LUCKY IMAGING

*Lucky Imaging* – це один із методів боротьби з впливом атмосфери, що базується на принципах спекл-інтерферометрії. Його суть полягає в тому, що, оскільки процес атмосферної турбуленції є стохастичним, то з серії отриманих зображень деякі фотографії будуть кращої якості, ніж інші, тобто міститимуть інформацію на рівні дифракційного обмеження. Тільки найкращі зображення відбирають, співставляють та усереднюють, що дає як результат зображення астрономічного об'єкта зі значно покращеною кутовою роздільною здатністю [1; 3; 4; 10].

Основним недоліком класичного методу Lucky Imaging є те, що в ньому для усереднення обираються лише цілі зображення достатньої якості, шанс отримання яких падає зі зростанням вхідної апертури телескопа. Також цей метод ніяк не бореться зі характерними спотвореннями, викликаними атмосферною турбуленцією, яка суттєво впливає на якість отриманого зображення, особливо для астрономічних об'єктів з великим кутовим розміром, як Сонце чи Місяць.

На основі методик Lucky Imaging та Avistack розроблено удосконалений алгоритм обробки астрономічних зображень. З його використанням статистичні методи обробки астрономічних зображень дозволяють на відносно дешевому обладнанні отримувати зображення астрономічних об'єктів, які за якістю та інформативністю не поступаються зображенням, отриманим на великих та дорогих телескопах з використанням адаптивної оптики чи інших методів боротьби з явищем атмосферної турбуленції. Таким чином, навіть астрономи-любители отримують інструмент, який дозволяє їм займатися спостереженнями на рівні з найбільшими обсерваторіями світу.

У статті описано удосконалення алгоритму обробки астрономічних зображень, яке враховує особливості атмосферної турбуленції та коригує спотворення, викликані ними. Сам алгоритм є доволі універсальним і підходить не лише для астрономічних зображень, але у цій статті показано роботу з зображеннями Сонця, отриманими на Астрономічній Обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка.

Реалізація алгоритму здійснена мовою програмування Python з використанням бібліотеки OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library).

**Ключові слова:** Lucky Imaging, атмосфера, турбулентність, хвильовий фронт, роздільна здатність, дифракційна межа, FWHM, best match, поле деформацій, фільтр Гауса, OpenCV, Python.

### IMPROVING THE ASTRONOMICAL IMAGES PROCESSING ALGORITHM USING LUCKY IMAGING

Lucky Imaging is one of the methods of combating atmospheric effects based on the principles of speckle interferometry. Its essence is that, since the process of atmospheric turbulence is stochastic, from the series of images obtained, some photos will be of better quality than others, that is, they will contain information at the level of the diffraction limit. Only the best images are selected, matched and averaged, resulting in an image of an astronomical object with significantly improved angular resolution [1; 3; 4; 10].

The main drawback of the classic Lucky Imaging method is that it selects only whole images of sufficient quality for averaging, the chance of obtaining which decreases with the increase of the aperture of the telescope. Also, this method does not combat the characteristic distortions caused by atmospheric turbulence, which significantly affects the quality of the obtained image, especially for astronomical objects with a large angular size, such as the Sun or the Moon.

An improved algorithm for processing astronomical images has been developed on the basis of Lucky Imaging techniques. With its use, statistical methods of astronomical image processing make it possible to obtain images of astronomical objects on relatively cheap equipment, which in terms of quality and informativeness are not inferior to images obtained on large and expensive telescopes using adaptive optics or other methods of combating the phenomenon of atmospheric turbulence. Thus, even amateur astronomers get a tool that allows them to make observations on a par with the world's largest observatories.

The article describes an improved algorithm for processing astronomical images, which takes into account the peculiarities of atmospheric turbulence and corrects the distortions caused by them. The algorithm itself is quite universal and suitable not only for astronomical images, but this article shows the work with images of the Sun obtained at the Astronomical Observatory of the Ivan Franko National University.

The algorithm was implemented in the Python programming language using the OpenCV library (Open Source Computer Vision Library).

**Key words:** Lucky Imaging, atmosphere, turbulence, wavefront, aperture, resolution, diffraction limit, FWHM, best match, deformation field, Gaussian filter, OpenCV, Python.

**Постановка проблеми.** Роздільна здатність наземних телескопів є суттєво обмеженою внаслідок впливу атмосферної турбуленції. Земна атмосфера не є однорідним середовищем, тому, внаслідок турбулентного змішування шарів повітря, які мають різну температуру, з'являються зони теплішого чи холоднішого повітря розмірами до одиниць метрів. Ця температурна неоднорідність викликає відповідні зміни коефіцієнту заломлення повітря. Плоский світловий фронт, проходячи через ці неоднорідності, неминуче спотворюється.

Нерегулярні спотворення хвильового фронту призводять до випадкових зміщень, розмиття та хаотичних змін яскравості зображення. Окрім турбулентного спотворення та молекулярного розсіяння, світло в атмосфері ще розсіюється на аерозолях – дрібних частках пилу, сажі, води. Це викликає появу ореолів навколо астрономічних об'єктів на отриманому зображенні.

Lucky Imaging – це один з методів боротьби з впливом атмосфери, що базується на принципах спекл-інтерферометрії. Його суть полягає в тому, що, оскільки процес атмосферної турбуленції є стохастичним, то з серії отриманих зображень деякі фотографії будуть кращої якості, аніж інші, тобто міститимуть інформацію на рівні дифракційного обмеження. Тільки найкращі зображення відбирають, співставляють та усереднюють, що дає в результаті зображення астрономічного об'єкта зі значно покращеною кутовою роздільною здатністю [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Основним недоліком класичного методу Lucky Imaging є те, що в ньому для усереднення обираються лише цілі зображення достатньої якості, шанс отримання яких падає зі зростанням вхідної апертури телескопа [1; 4]. Також, цей метод ніяк не бореться з характер-

ними спотвореннями, викликаними атмосферною турбуленцією, яка суттєво впливає на якість отриманого зображення, особливо для астрономічних об'єктів з великим кутовим розміром, як Сонце чи Місяць [7; 8; 9].

Зважаючи на ці недоліки, з'явилася потреба розробити алгоритм обробки серій короткоекспозиційних астрономічних зображень на основі методики Lucky Imaging, який би міг обирати для усереднення не цілі зображення, а його ділянки з найкращою якістю. Також, алгоритм повинен боротися з деформаціями, спричиненими впливом атмосферної турбуленції.

Для досягнення поставлених цілей необхідно виконати такі основні кроки:

- Побудувати векторне поле деформацій для кожного зображення з серії відносно еталонного зображення.
- Застосувати зворотню деформацію до всіх зображень згідно знайденого для них поля деформацій, приводячи кожне таке зображення до еталонного.
- Зробити оцінку якості кожної ділянки на всіх зображеннях та провести рангування за цим критерієм.
- Провести усереднення тих ділянок зображень, які відповідають вхідному критерію (наприклад, 10 % найкращих ділянок).

Як вхідні дані обрано серію астрономічних фотографій Сонця, знятих на Астрономічній Обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка.

**Виклад основного матеріалу.** Дані з дослідницької камери отримуються в форматі RAW. В першу чергу ці зображення конвертуються в формат TIFF за допомогою утиліти RAW2TIFF з коефіцієнтом гамма рівним 1. У наборі зображень також містяться так звані *флетфілди* (англ. Flat – плоске, field – поле) – це зображення, зняті з розсіювачем на об'єктиві. Вони дозволяють отримати інформацію про неоднорідності матриці, оптики, їх забруднення пилом і т.ін. Програма автоматично визначає, які із зображень є флетфілдами і усереднює їх для отримання основного *мастер-флетфілду*. В подальшому всі отримані зображення Сонця коректуються за допомогою мастер-флетфілда для того, щоб прибрати неоднорідності матриці та оптики. Далі з зображень в нашому випадку виділяється зелений канал. Це робиться тому, що в матрицях цифрових камер (не астрономічних) зелених світлочутливих елементів вдвічі більше, ніж червоних та синіх. Причиною цього є те, що людський зір найчутливіший до зеленої частини спектру. Таким чином, цифрові камери краще передають нюанси освітленості в цій області спектру. В професійних астрономічних камерах використовуються матриці, які реєструють лише інтенсивність, а фільтрація вхідного світла виконується необхідним фільтром. Отримані зображення центруються по диску Сонця, і обрізаються по краях сонячного диску з деяким запасом.

Серед підготовлених зображень проводиться початкове відсіювання за середньою яскравістю. Це дозволяє зразу усунути зображення, затемнені хмарністю. Серед зображень, що залишилися, проводиться рангування за якістю (чіткістю деталей) і найкраще зображення вибирається як еталонне.

Вхідні зображення обробляються фільтром Гауса для того, щоб зменшити рівень шуму. За своїм характером зображення поверхні Сонця є достатньо малокоонтрастним та шумоподібним, тому шуми, які виникають на матриці цифрової камери, вносять суттєві похибки в роботу алгоритму на етапі пошуку карти деформацій. Фільтрація фільтром Гауса експериментально показала суттєве покращення результатів.

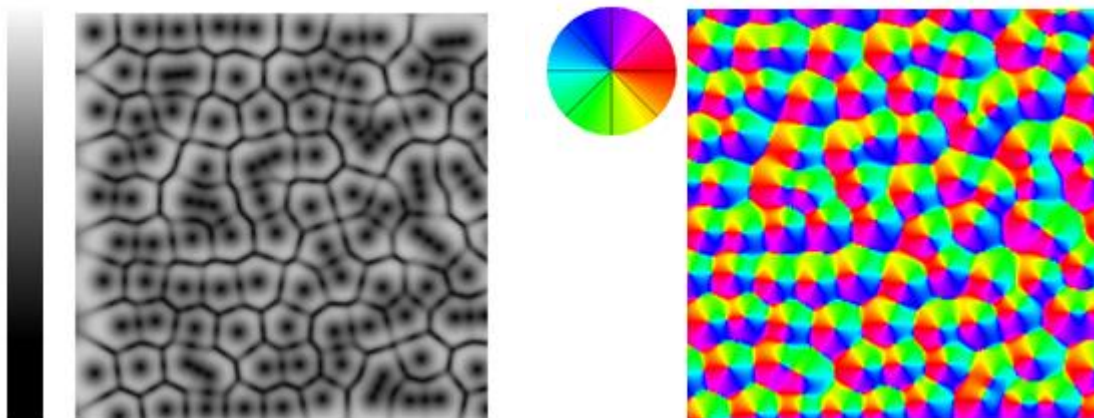
Зауважимо, що зображення фільтруються лише для етапу пошуку поля деформацій поточного зображення відносно еталонного. Оригінальні зображення не змінюються, інакше розмиття цим фільтром призвело б до суттєвого погіршення якості результату.

Для оцінки якості роботи алгоритму поле деформацій було візуалізовано. Модуль вектора зміщення відображався у вигляді інтенсивності, а напрямок – кольором. Для полегшення сприйняття візуалізація напрямку та модуля відбувалася на двох окремих зображеннях.

Як вхідні параметри на етапі розрахунку векторного поля деформацій використовуються максимальний радіус пошуку, зона розрахунку *best match* (англ. – найкраще співпадіння) та крок сітки.

На еталонному зображенні обирається ділянка, розмір якої заданий параметром зони розрахунку *best match*. Центр цієї зони знаходиться на вузлі сітки пошуку. На відповідному вузлі сітки на поточному зображенні (те, для якого ми шукаємо вектори зміщення) розраховується коефіцієнт співпадіння (*best match*) з еталонною ділянкою для кожного пікселя в межах радіусу пошуку. Серед отриманих значень коефіцієнта співпадіння нам потрібно обрати максимальне. Позиція глобального максимуму відносно поточного вузла сітки, теоретично, і буде вектором зміщення ділянки поточного зображення відносно еталонного. На практиці ж, через шумоподібний характер зображення, матриця значень містить дуже багато паразитних локальних максимумів. Також трапляється, що паразитний максимум є глобальним. Проте це трапляється відносно рідко, а, оскільки, алгоритм статистичний і обробляє велику кількість

зображень, то ці похибки суттєво згладжуються. З цими ефектами допомагає боротися попередня та подальша фільтрація цих зображень та отриманих векторів фільтром Гауса, що була зазначена раніше.

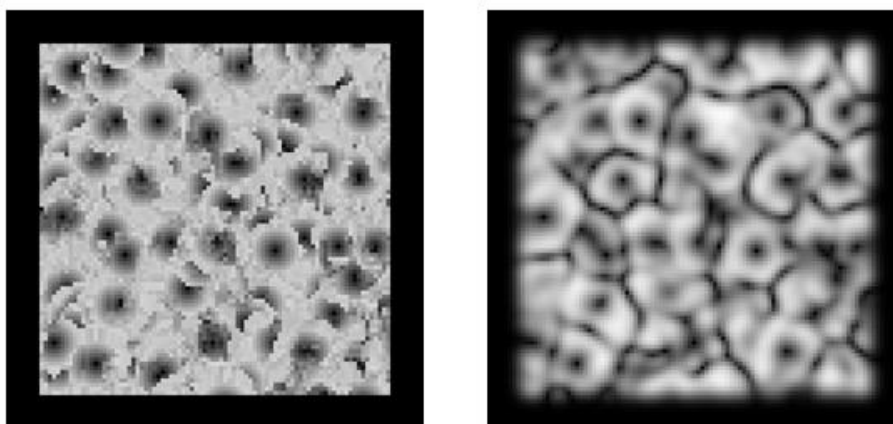


**Рис. 1. Візуалізація модуля вектора зміщень (зліва) та напрямку (справа)**

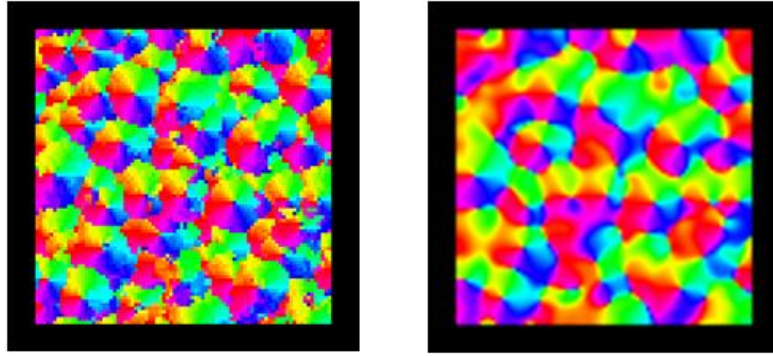
Розмір зони розрахунку кореляції береться порядку розміру проєкції області ізопланатизму на матрицю камери. Найкращі результати були отримані для зони  $3 \times 3$  пікселів, що співпадає з теоретично розрахованими значеннями. Радіус пошуку був обраний величиною  $2 \times \text{FWHM}$  (Full width at half maximum) атмосферної ФРТ (функції розсіювання точки). Це було зроблено з розрахунку на те, що, через характер форми атмосферної ФРТ, в цей радіус потрапляє порядка 90 % енергії. Таким чином, ми забезпечуємо себе від попадання на паразитні максимуми сусідніх зон, разом з тим втрачаючи статистично незначну кількість реальних. Для наших умов FWHM атмосферної ФРТ складає близько 3-4 пікселів, отже радіус пошуку був обраний величиною 4 пікселів.

Оскільки величина зміщень спричинених турбуленцією на зображеннях є розміром порядка кількох пікселів, то для отримання хорошого результату потрібна субпіксельна точність. Хороший результат дає простий пошук центру ваги для матриці пікселів розміром  $3 \times 3$ , центр якої знаходиться за координатами нашого вектора. Уточнені значення векторів зміщення записуються покомпонентно в 2 масиви у вигляді  $vecX(i, j)$ ,  $vecY(i, j)$ .

З огляду на те, що характер зображень є достатньо шумоподібним, то й результат пошуку векторів зміщень містить компоненту шуму. Для того, щоб згладити отримані значення векторів, вони фільтруються покомпонентно медіанним та Гаусовим фільтрами. Після цього вектори домножуються на певний поправочний коефіцієнт для врахування апертурності розрахунку best match та остаточних фільтрів. Сам коефіцієнт був вирахований експериментально і його значення є предметом подальших досліджень.



**Рис. 2. Зліва зображена візуалізація модуля поля векторів без згладжування. Справа – модуль поля векторів згладжених покомпонентно. Результат отриманий на реальних зображеннях Сонця. Можна побачити характерну форму «бульбашок» атмосферної турбуленції**

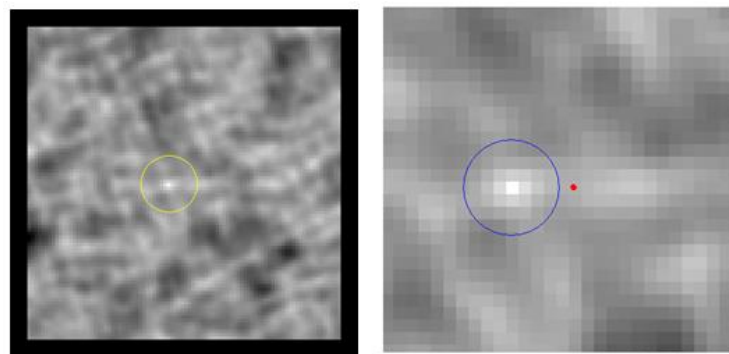


**Рис. 3. Напрямки векторів зміщення для незгладжених (зліва) та згладжених векторів (справа)**

Після того, як знайдено поля векторів деформацій для кожного зображення з набору, знаходимо поле *residual* – поле залишкових деформацій. Для цього знаходимо середній вектор для кожного вузла сітки по всіх зображеннях з набору. Це поле буде використане під час остаточної зворотної деформації результатів.

Для знаходження коефіцієнту співпадіння ділянок зображень було апробовано декілька методів оцінки *best match*. Більшість з них дало поганий результат.

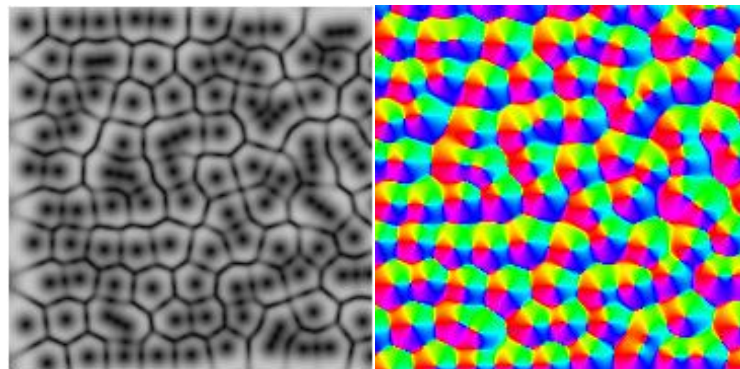
У статті Martin J. та Crowley J.L. [5] було згадано, що для шумоподібних зображень найстабільніші результати дає метод суми квадратів різниць. В OpenCV ці методи є під назвою SQDIFF і SQDIFF\_NORM. Апробація методу SQDIFF\_NORM дала дуже чіткий результат на тестовому зображенні.



**Рис. 4. Метод SQDIFF\_NORMED. Чітко видно максимальне співпадіння в точці, зміщеній на 5 пікселів**

Для того, щоб протестувати правильність роботи алгоритму, було створено програму, яка генерує штучні зображення, подібні за характеристиками до реальних. Програма створює два спотворених зображення з наперед порохованими векторами зміщень для того, щоб можна було порівняти результат роботи алгоритму з ними.

Результати, отримані алгоритмом, виявилися візуально дуже подібними зі згенерованими, тому роботу алгоритму пошуку поля деформацій можна вважати достатньо коректною.



**Рис. 5. Модуль та напрямок векторів зміщень еталонного зображення, згенеровані програмою**

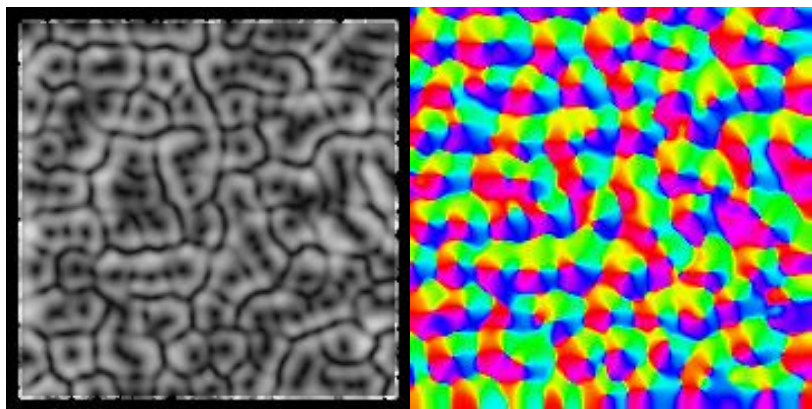


Рис. 6. Результати обробки алгоритмом еталонних зображень

Далі до кожного зображення застосовується зворотня деформація по векторному полю деформацій із застосуванням у нашому випадку білінійної інтерполяції. Таким чином, всі зображення приводяться до еталонного. Оскільки Lucky Imaging базується на виборі найкращих зображень для усереднення, то на цьому етапі відбувається оцінка якості кожної ділянки, їх рангування та визначення найкращих ділянок для подальшого усереднення. Під час усереднення обраних ділянок їхні краї згладжуються, щоб уникнути появи артефактів на границях стиків ділянок.

Останнім етапом роботи алгоритму є остаточна деформація отриманого зображення по полю residual. Оскільки еталонне зображення теж є деформованим атмосферою, то і всі зображення, приведені до нього, є все ще спотвореними. Звісно, ми не можемо знайти точне значення векторів поля деформацій для еталонного зображення, проте усереднення векторів зміщень по великому набору дозволяє отримати статистичне очікування для цих векторів. Зворотня деформація результату по полю цих векторів дозволить максимально приблизити результат до ідеального.

Для оцінки ефективності роботи алгоритму було розроблено комплекс програм, який дозволяє кожен етап його роботи опрацювати з різними параметрами.

Навіть на невеликому наборі вхідних даних було отримано візуально помітний результат – зображення Сонця з покращеною роздільною здатністю.

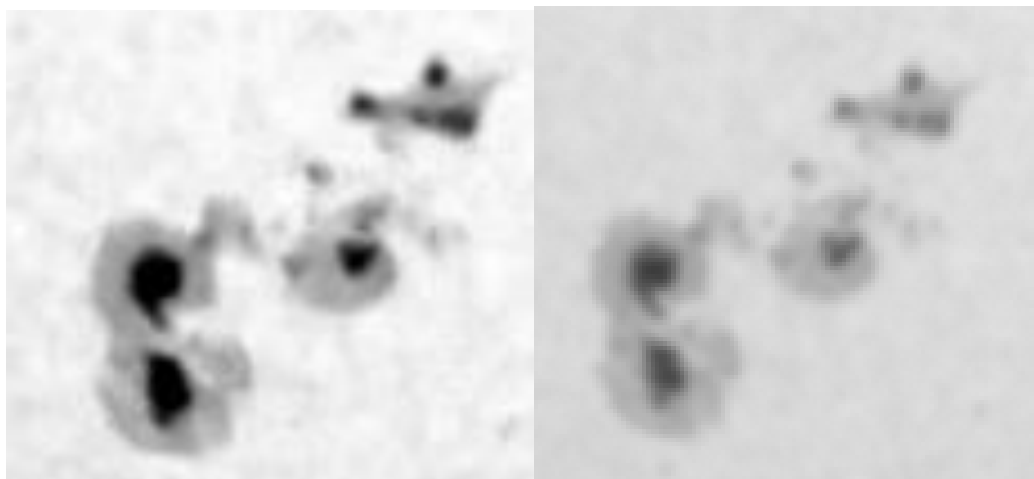


Рис. 7. Зліва – результат роботи алгоритму, справа – просте усереднення набору

**Висновки.** Як підсумок, розроблено покращений алгоритм Lucky Imaging, який дозволяє суттєво збільшити ефективність такого підходу до обробки астрономічних зображень.

Прототип алгоритму продемонстрував дієздатність, тому доцільною є його подальша розробка. Наступним кроком може бути автоматизація та оптимізація параметрів обробки алгоритму, оскільки вони залежать від стану атмосфери в період проведення зйомки, характеристик об'єкта спостережень та ін. Також суттєвим завданням є оптимізація алгоритму для пришвидшення його роботи.

Автори висловлюють свою вдячність Підстригачу І. Я., завідувачу відділення обслуговування телескопів Астрономічної Обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка, за надані вичерпні консультації та серію реальних зображень Сонця для тестування роботи алгоритму.

**Список використаних джерел:**

1. Brandner W., Hormuth F. Lucky Imaging in Astronomy. *Astrophysics and Space Science Library, Germany*. 2016. P. 1-16.
2. Guyon O. Extreme Adaptive Optics (Review). *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 56, P.315-355.
3. Huang X., Li B., Wang J., Li Ju. A real-time lucky imaging algorithm based on Fourier transform and its implementation techniques. *Astronomical Society of Japan*. 2021. Vol. 73(5). P. 1240-1254.
4. Law N. M. Lucky Imaging: Diffraction-limited astronomy from the ground in the visible. *The Observatory*. 2007. Vol. 127. № 1. P. 71.
5. Martin J., Crowley J. L. Experimental Comparison of Correlation Techniques. Grenoble, France: IMAG-LIFIA, 2007. 9 p.
6. Oscoz A., Rebolo R., Lopez R., et al. FastCam: a new lucky imaging instrument for medium-sized telescopes. *Proc. SPIE*. 2008. Vol. 7014. P. 701447.
7. Tubbs R. N. Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere : Dissertation submitted in candidature for the degree of Doctor of Philosophy in the University of Cambridge : St. Johns College Cambridge University, 2003. 183 p.
8. Wang P., Sang X., Yu X., et al. A full-parallax tabletop three dimensional light-field display with high viewpoint density and large viewing angle based on space-multiplexed voxel screen. *Optics Communications*. 2021. Vol.488.
9. Willey E.O. A Pixel Correlation Technique for Smaller Telescopes to Measure Doubles. *Journal of Double Star Observations*. 2013. Vol. 9. № 2. P. 142-152.
10. Wu X., Yan J., Wu K., Huang Ya. Integral lucky imaging technique for three-dimensional visualization of objects through turbulence. *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol.125.

**References:**

1. Brandner W., Hormuth F. (2016). Lucky Imaging in Astronomy. *Astrophysics and Space Science Library, Germany*. 1-16.
2. Guyon O. (2018). Extreme Adaptive Optics (Review). *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56, 315-355.
3. Huang X., Li B., Wang J., Li Ju. (2021). A real-time lucky imaging algorithm based on Fourier transform and its implementation techniques. *Astronomical Society of Japan* 73(5). 1240-1254.
4. Law, N. M. (2007). Lucky Imaging: Diffraction-limited astronomy from the ground in the visible. *The Observatory*, 127.1, 71.
5. Martin, J. & Crowley, J. L. (2007). Experimental Comparison of Correlation Techniques. Grenoble, France: IMAG-LIFIA.
6. Oscoz A., Rebolo R., Lopez R., et al. (2008). FastCam: a new lucky imaging instrument for medium-sized telescopes. *Proc. SPIE*, 7014, 701447.
7. Tubbs R. N. (2003). Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere. *Doctor's thesis*. St. Johns College Cambridge University.
8. Wang P., Sang X., Yu X., et al. (2021). A full-parallax tabletop three dimensional light-field display with high viewpoint density and large viewing angle based on space-multiplexed voxel screen. *Optics Communications*, 488.
9. Willey E.O. (2013). A Pixel Correlation Technique for Smaller Telescopes to Measure Doubles. *Journal of Double Star Observations*, 9.2, 142-152.
10. Wu X., Yan J., Wu K., Huang Ya. (2020). Integral lucky imaging technique for three-dimensional visualization of objects through turbulence. *Optics & Laser Technology*, 125.