

ТЕЛЕСКОПИ. МЕТОДИ І ЗАСОБИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ, ВИМІРЮВАНЬ І АНАЛІЗУ В АСТРОНОМІЇ. МАЛІ ПЛАНЕТИ. АСТЕРОЇДИ. ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ В НАУКАХ ПРО ПРОСТІР І ЧАС: ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ, АСТРОНОМІЇ І Т.П.

УДК: 520.2:520.8:523.44:51-71

Кожухов О.М., кандидат технічних наук

Центр прийому спеціальної інформації та контролю навігаційного поля, Україна, Хмельницька обл., Дунаєвецький р-н, с. Залісці

Брюховецький О.Б., кандидат технічних наук

Західний центр радіотехнічного спостереження, Україна, Закарпатська обл., м. Мукачево

Кожухов Д.М., Кучук Є.Ю.

Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Україна, м. Київ

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА СЕРІЯХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Значну частину інформації про малі космічні об'єкти, такі як астероїди, комети або штучні супутники Землі, включаючи космічне сміття, отримується шляхом аналізу оптичних спостережень. Розвиток світлоприймальної апаратури та обчислювальної техніки привів до появи значної кількості методів автоматичного виявлення подібних об'єктів, як тих, що мають ненульовий видимий рух (у більшості випадків застосовується лінійна модель) на серії кадрів.

У роботі розглянуті головні групи існуючих зараз методів автоматичного (автоматизованого) виявлення малих космічних об'єктів, їх особливості, наведені приклади оптичних засобів спостереження, що використовують ті або інші методи, що описуються.

Ключові слова: оптичні спостереження космічних об'єктів, методи обробки оптичних спостережень.

Вступ. Поява панорамних ПЗЗ-приймачів випромінювання призвело до революції в астрономії спостережень. Так само це торкнулося спостережень за малими тілами Сонячної системи (астероїди, комети) й об'єктами штучного походження (космічні апарати, космічне сміття), особливо методів їх автоматичного виявлення. Другим серйозним поштовхом для розвитку методів виявлення даних об'єктів став стрімкий розвиток обчислювальної техніки, який дозволив застосовувати в них алгоритми з порівняно великими обчислювальними витратами.

Все вищевикладене призвело до появи значної кількості різних методів і алгоритмів обробки ПЗЗ-зображень для виявлення як малих тіл Сонячної Системи, так і космічних апаратів і космічного сміття. У зв'язку з цим, на думку авторів, доцільним є проведення аналізу наявних на сьогодні методів виявлення космічних об'єктів.

Особливістю вищезгаданих об'єктів, як об'єктів спостереження, є їх досить помітний видимий рух на тлі зірок. Ця ознака зазвичай береться за основу при розробці методів їх виявлення. Виявлення здійснюється як пошук об'єктів з ненульовим видимим рухом на серії кадрів (два і більше кадрів однієї ділянки неба, знятих з однією експозицією і з деяким часовим проміжком між ними, або безперервно). Крім того, багато хто з таких об'єктів має порівняно слабкий блиск, що серйозно ускладнює завдання їх виявлення.

Методи виявлення рухомих об'єктів на серії ПЗЗ-кадрів.

Найбільш простим методом виявлення таких об'єктів є використання програмного блінк-

компаратора, реалізоване, наприклад, у програмі Astrometrica (<http://astrometrica.at/>). У цьому випадку об'єкт, що рухається, виявляється спостерігачем при перегляді кадрів серії, які змінюють один одного. Даний метод дає непогані результати, але не може бути використаний для оперативного опрацювання великої кількості кадрів.

Також, в даний час відома величезна кількість алгоритмів автоматичного виявлення малих тіл Сонячної системи або штучних об'єктів в навколосемному космічному просторі на ПЗЗ (КМОН)-зображеннях. Більшість з них може вважатися варіантами виявлення, заснованими на статистичній перевірці багатозначних гіпотез (multiple hypothesis testing, МНТ) [1].

Залежно від особливостей реалізації МНТ можна виділити кілька груп методів. До першої групи можна віднести методи, що реалізують технологію «виявлення перед супроводом» (detect-before-track, DBT) (рис. 1). У них спочатку проводиться виявлення і формування списку виявлених зображень об'єктів (позначок) на кожному кадрі досліджуваної серії. Потім, для всіх пар позначок на двох обраних кадрах оцінюються параметри можливих траєкторій, будуються строби (довірчі області) для всіх інших кадрів, і перевіряється наявність в них позначок, які підтверджують наявність об'єктів. Визначення попередніх параметрів траєкторії необхідно для зменшення кількості гіпотез, що перевіряються. Більш кращим для первинного аналізу є вибір в якості первинної пари першого і останнього кадру серії, тому що такий підхід дозволяє зменшити гранично можливі розміри довірчої області.

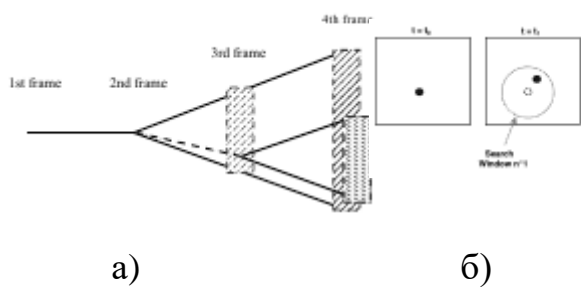


Рис. 1 – Реалізація методу DBT на чотирьох кадрах:
а) за [4] із відсутністю позначки на третьому кадрі;
б) за [5].

Варіанти таких алгоритмів реалізовані в програмному забезпеченні, яке застосовується у проєкті Lincoln Near Earth Asteroid Research (LINEAR) [2,3], в системі обробки зображень телескопа для спостереження космічного сміття Європейського космічного агентства (ESA Space Debris Telescope - ESASDT) [4], у французькій системі Rapid Action Telescope for Transient Objects (TAROT) [5] (рис. 1), системі обробки для рухомих об'єктів (Moving Objects Processing System, MOPS) американського проєкту Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) [6,7] та інших. При значній кількості, позначок, що аналізуються (що практично неминуче при порівняно низьких порогах первинного виявлення або при великих полях зору оглядових телескопів), такі методи можуть мати значну обчислювальну складність. Для її зниження можуть застосовуватися різні алгоритми пошукової оптимізації, наприклад, організація ієрархічного класифікатора на основі k-мірних дерев [6, 7] (рис. 2).

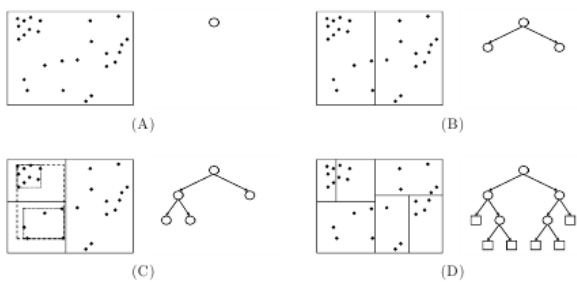


Рис. 2 – Приклад рекурсивного формування k-мірного дерева за [6]

Більш складними реалізаціями МНТ є різні варіанти узгодженої фільтрації (Matched Filtering, MF) в просторово-часовій області. Методи даної групи базуються на формуванні всіх можливих гіпотез про параметри траєкторій рухомих об'єктів на розглянутій серії кадрів. Для кожної гіпотези за певними правилами визначається її вага (максимальна функція правдоподібності, апостеріорна ймовірність і т. д.). Гіпотези з вагою вище заданої визнаються дійсними, а відповідні їм умовні оцінки параметрів траєкторій видаються споживачеві. Такий підхід, з розвитком

обчислювальної техніки, дозволив збільшити кількість виявлених об'єктів зі слабким блиском. Перша робота, яка описувала подібний метод, була представлена Моханті [8]. Потім кількість подібних робіт тільки збільшувалася. Велика кількість ранніх робіт на дану тематику представлено в [9], більш сучасний огляд можна знайти, наприклад, в [10]. До цієї ж групи можна віднести роботи [11, 12].

Як окремий варіант MF варто згадати методи, засновані на технології «shift-and-add» («shift-and-stack») або методи некогерентного післяпорогового накопичення з нульовим порогом. Як приклад подібних методів можна привести, наприклад, [13-16]. У них гіпотези про наявність рухомого об'єкту перевіряються шляхом складання зі зміщенням вздовж можливих траєкторій об'єктів ПЗЗ-кадрів однієї ділянки небесної сфери. У [13] (рис. 3) для зменшення обчислювальної складності пропонується перевірка гіпотетичних траєкторій астероїда складанням зі зміщенням із застосуванням медіанної фільтрації тільки ділянки кадру навколо кожної неоднорідності зображення, яка енергетично незначно перевершує фон. У більш пізній роботі [17] для підвищення швидкості застосовується накопичення бінарних зображень, які формуються за допомогою первинного ненульового порога. Іншим варіантом зниження обчислювальної складності є вибір декілька більшого кроку зміщення [9] кадрів, що складаються. Це призводить до деякого зниження кількості виявлених об'єктів, в порівнянні з оптимальним розміром кроку. Також значно знижує складність обчислень апріорна інформація про швидкість і напрямок руху об'єктів [15].

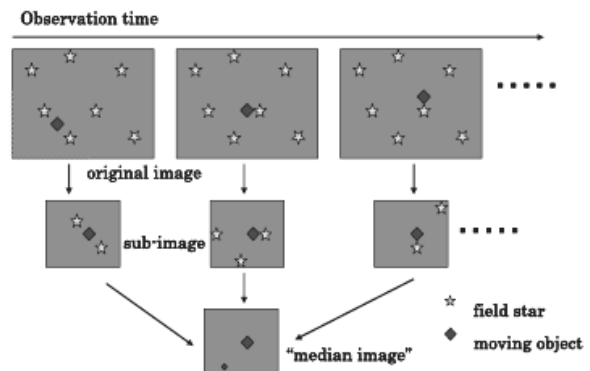


Рис. 3 – Варіант методу «shift-and-stack» [13]

До недоліків даної групи методів слід віднести необхідність значної кількості послідовно сформованих кадрів, що істотно знижує пошуковий потенціал телескопів. З іншого боку, її перевагою є високі показники якості виявлення об'єктів зі слабким блиском. І MF, і «shift-and-stack» методи можуть бути віднесені до методів «супровід перед виявленням» (track-before-detect, TBD).

Також існує ще один TBD-метод виявлення рухомих об'єктів – метод табуляції. Його суть полягає в табуляції ваг гіпотез про кількість і параметри руху об'єктів на множині всіх таких гіпотез (множина станів). При цьому в якості ваги

може використовуватися, наприклад, функція правдоподібності (критерій максимальної правдоподібності). Фізично даний метод відповідає накопиченню статистик зображень (наприклад, амплітуд позначок, яскравість окремих пікселів) уздовж можливих траєкторій руху об'єкта. Об'єкт, що рухається, вважається виявленим, якщо накопичена у якомусь стробі статистика перевищує поріг. Початкові параметри руху об'єкта є середніми значеннями для даного стробу й можуть у подальшому уточнюватися.

Основною методу табуляції найчастіше є використання перетворень Радону [18] або Хафа [19]. Прикладами можуть служити робота [20], а також вітчизняна програма автоматизованого виявлення астероїдів CoLiTec [21, 22]. В останньому випадку використовується віртуальна табуляція позначок, отриманих на етапі первинної обробки. Таким чином, використовуваний в CoLiTec метод виявлення являє собою суміш DBT і TBD підходів. Також дані перетворення використовуються для виявлення об'єктів з великою швидкістю руху, зображення яких на окремих кадрах змазані власним рухом (є штрихами), наприклад, [23 – 25]. Перевагою таких методів є лінійна залежність обчислювальної складності від кількості аналізованих відміток, що є найкращим можливим варіантом.

Всі вищеописані методи використовують лінійну модель руху небесного об'єкта на серії кадрів. Більш складні моделі руху використовуються тільки при об'єднанні

спостережень за кілька ночей – міжнічним зв'язуванні (inter-night linking) як це робиться, наприклад, в MOPS [6].

Висновки. Більшість сучасних оптичних засобів спостереження космічного простору використовують спеціальне програмне забезпечення для автоматичного (автоматизованого) виявлення рухомих об'єктів. В основі даного програмного забезпечення лежать різні методи виявлення, більшість з яких є варіантами методу статистичної перевірки багатозначних гіпотез. При цьому в якості моделі руху об'єкта зазвичай використовується найпростіша модель прямолінійного лінійного руху по обох координатах.

До основних групи методів виявлення можна віднести методи «виявлення-перед-супроводом» (DBT), методи, які реалізують принципи узгодженої фільтрації, включаючи «shif-and-stack» варіанти, а також методи табуляції.

Обчислювальна складність методів першої групи залежить від кількості аналізованих відміток, а другої групи – від розмірів і кількості аналізованих кадрів серії, а також від розмірів областей аналізованих параметрів траєкторії і кроку їх перебору. В обох випадках приймаються спеціальні заходи для зниження обчислювальної складності при використанні. Окремо слід відзначити методи третьої групи, в яких обчислювальна складність має лінійну залежність від кількості статистик (позначок або пікселів), що аналізуються.

Перелік джерел

1. Lee J., Zubair L., Virani S., Murphy T., Holzinger M.J. *Hardware-in-the-Loop Comparison of Space Object Detection and Tracking Methodologies*. AAS 16-266.
2. Stokes, G. H., Evans, J. B., Vighh, H. E. M., Shelly, F. C., & Pearce, E. C. *Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR)*. 2000, *Icarus*, 148, 21
3. Stokes G. H. *The Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) Program*/ G. H. Stokes, F. Shelly, H. E. M. Vighh et all // *Lincoln Laboratory Journal*. – 1998. –Vol. 11, No. 1. P. 27–40.
4. Früh C, Schildknecht T. *Object Image Linking of Earth Orbiting Objects in the Presence of Cosmics*, *Advances in Space Research*, V. 49, Issue 3, 2012, Pages 594-602, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.021>
5. Rios Bergantiños S., Deguine B., Klotz A., Thiebaut C., Foliard J., Boër M. *Improvement of the TAROT System Used for Space Debris Optical Observations and Observation Campaign Results, Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18-20 April 2005, ESA SP-587, NASA ADS: 2005ESASP587...125R*
6. Kubica, J., et al. *Efficient intra- and inter-night linking of asteroid detections using kd-trees*. 2007, *Icarus*, 189, 1, 151-168
7. Larry Denneau, Robert Jedicke, Tommy Grav, Mikael Granvik, Jeremy Kubica et al. *The Pan-STARRS Moving Object Processing System*. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125:357–395, 2013 April
8. N. C. Mohanty, "Computer Tracking of Moving Point Targets in Space," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, vol. 3, no. , pp. 606-611, 1981
9. Gural P.S. *Matched Filter Processing for Asteroid Detection*/ P.S. Gural, J.A. Larsen, A.E. Gleason // *The Astronomical Journal*. – 2005. – 130. – P. 1951-1960.
10. Murphy T.S., Holzinger M.J. *Uncued Low SNR Detection with Likelihood from Image Multi Bernoulli Filter*. <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/SSA-Algorithms/Murphy.pdf>.
11. Shucker B.D., Stuart J.S. *Detecting Asteroids with a Multi-Hypothesis Velocity Matched Filter*. *Asteroids, Comets, Meteors* (2008), 8388.pdf.
12. Miura N., Itagaki K., Baba N. *Likelihood-Based Method for Detecting Faint Moving Objects*. *The Astronomical Journal*, 130:1278–1285, 2005 September.
13. Yanagisawa, T., Nakajima A., Kadota K., Kurosaki H., Nakamura T., Yoshida F., Dermawan B., Sato Y. *Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 57, p. 399-408, 2005

14. Zhai C., Shao M., Nemati B., Werne T., Zhou H., Turyshev S.G., Sandhu J., Hallinan G., Harding L.K. *Detection of a Faint Fast-Moving Near-Earth Asteroid Using the Synthetic Tracking Technique. The Astrophysical Journal*, 792:60 (14pp), 2014.
15. Heinze A.N., Metchev S., Trollo J. *Digital Tracking Observations can Discover Asteroids 10 Times Fainter than Conventional Searches. The Astronomical Journal*, 150:125 (25pp), 2015
16. Wang, B.; Zhao, H. B.; Li, B. *Detection of Faint Asteroids Based on Image Shifting and Stacking Method. Acta Astronomica Sinica*, vol. 58, no. 5, article id. 49. 2017
17. Yanagisawa T., Kurosaki H. *Detection of Faint GEO Objects Using JAXA's Fast Analysis Methods // Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan. – Vol. 10, No. ists28, pp. Pr_29-Pr_35, 2012*
18. Radon, J. 1917, *Berichte ber die Verhandlungen der Kniglich-Schsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Physische Klasse*, 262 translated by Parks, P. C. 1986, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 5, 170
19. Hough, Pat. 3069354 USA / *Method and means for recognizing complex patterns / P.V.C. Hough. – Publ. 1962.*
20. G. Richards, "Application of the Hough transform as a track-before-detect method," *IEE Colloquium on Target Tracking and Data Fusion*, Nov 1996, pp. 2/1–2/3, 10.1049/ic:19961349.
21. В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков, В. П. Власенко *Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском// Космічна наука і технологія. 2012. Т. 18. № 1. С. 39–46.*
22. Саваневич В. Е. *Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами / В. Е. Саваневич, А. М. Кожухов, А. Б. Брюховецкий, Е. Н. Диков // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: ХУІС, 2011. – Bun. 2(92). – С. 137 – 144. (The Method of Asteroid Detection, Based on After-Threshold Accumulation of Signal Statistic In Space of Asteroid Trajectory Parameters V.E. Savanevich, A.B. Bryukhovetskiy, A.M. Kozhukhov, E.N. Dikov)*
23. Ciurte, A., R. Danescu, *Automatic detection of MEO satellite streaks from single long exposure astronomic images, Proceedings of International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), Lisbon, Portugal, 2014 4, https://cv.utcluj.ro/amheos/tl_files/amheos/Docs/visapp_submitted_version.pdf/*
24. Zimmer, P.C., M.R. Ackermann, J.T. McGraw, *GPU-accelerated faint streak detection for uncued surveillance of LEO. // Proceedings of AMOS Conference, Maui, Hawaii, 2013, https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/Optical_Systems/ZIMMER.pdf.*
25. Nir G., Zackay B., Ofek E.O. *Optimal and Efficient Streak Detection in Astronomical Images. The Astronomical Journal*, 156, 5:229, 2018.

References

1. Lee J., Zubair L., Virani S., Murphy T., Holzinger M.J. *Hardware-in-the-Loop Comparison of Space Object Detection and Tracking Methodologies. AAS 16-266.*
2. Stokes, G. H., Evans, J. B., Vighh, H. E. M., Shelly, F. C., & Pearce, E. C. *Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR). 2000, Icarus, 148, 21*
3. Stokes G. H. *The Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) Program/ G. H. Stokes, F. Shelly, H. E. M. Vighh et all // Lincoln Laboratory Journal. – 1998. –Vol. 11, No. 1. P. 27–40.*
4. Früh C, Schildknecht T. *Object Image Linking of Earth Orbiting Objects in the Presence of Cosmics, Advances in Space Research, V. 49, Issue 3, 2012, Pages 594-602, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.021>*
5. Rios Bergantiños S., Deguine B., Klotz A., Thiebaut C., Foliard J., Boër M. *Improvement of the TAROT System Used for Space Debris Optical Observations and Observation Campaign Results, Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18-20 April 2005, ESA SP-587, NASA ADS: 2005ESASP587...125R*
6. Kubica, J., et al. *Efficient intra- and inter-night linking of asteroid detections using kd-trees. 2007, Icarus, 189, 1, 151-168*
7. Larry Denneau, Robert Jedicke, Tommy Grav, Mikael Granvik, Jeremy Kubica et al. *The Pan-STARRS Moving Object Processing System. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125:357–395, 2013 April*
8. N. C. Mohanty, "Computer Tracking of Moving Point Targets in Space," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, vol. 3, no. , pp. 606-611, 1981
9. Gural P.S. *Matched Filter Processing for Asteroid Detection/ P.S. Gural, J.A. Larsen, A.E. Gleason //The Astronomical Journal. – 2005. – 130. – P. 1951-1960.*
10. Murphy T.S., Holzinger M.J. *Uncued Low SNR Detection with Likelihood from Image Multi Bernoulli Filter. <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/SSA-Algorithms/Murphy.pdf>.*
11. Shucker B.D., Stuart J.S. *Detecting Asteroids with a Multi-Hypothesis Velocity Matched Filter. Asteroids, Comets, Meteors (2008), 8388.pdf.*
12. Miura N., Itagaki K., Baba N. *Likelihood-Based Method for Detecting Faint Moving Objects. The Astronomical Journal, 130:1278–1285, 2005 September.*
13. Yanagisawa, T., Nakajima A., Kadota K., Kurosaki H., Nakamura T., Yoshida F., Dermawan B., Sato Y. *Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects, Publ. Astron. Soc. Japan, 57, p. 399-408, 2005*

14. Zhai C., Shao M., Nemati B., Werne T., Zhou H., Turyshev S.G., Sandhu J., Hallinan G., Harding L.K. *Detection of a Faint Fast-Moving Near-Earth Asteroid Using the Synthetic Tracking Technique. The Astrophysical Journal*, 792:60 (14pp), 2014.
15. Heinze A.N., Metchev S., Trollo J. *Digital Tracking Observations can Discover Asteroids 10 Times Fainter than Conventional Searches. The Astronomical Journal*, 150:125 (25pp), 2015
16. Wang, B.; Zhao, H. B.; Li, B. *Detection of Faint Asteroids Based on Image Shifting and Stacking Method. Acta Astronomica Sinica*, vol. 58, no. 5, article id. 49. 2017
17. Yanagisawa T., Kurosaki H. *Detection of Faint GEO Objects Using JAXA's Fast Analysis Methods // Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan. – Vol. 10, No. ists28, pp. Pr_29-Pr_35, 2012*
18. Radon, J. 1917, *Berichte ber die Verhandlungen der Kniglich-Schsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Physische Klasse*, 262 translated by Parks, P. C. 1986, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 5, 170
19. Hough, Pat. 3069354 USA / *Method and means for recognizing complex patterns / P.V.C. Hough. – Publ. 1962.*
20. G. Richards, "Application of the Hough transform as a track-before-detect method," *IEE Colloquium on Target Tracking and Data Fusion*, Nov 1996, pp. 2/1–2/3, 10.1049/ic:19961349.
21. V. E. Savanevich, A. B. Bryukhovetskiy, A. M. Kozhukhov, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko *The Program CoLiTec for Automated Detection of Faint Celestial Bodies // Space Science and Technology. – 2012. – V. 18. – № 1. P. 39–46. [in Russian]*
22. Savanevich V.E. *The Method of Asteroid Detection, Based on After-Threshold Accumulation of Signal Statistic In Space of Asteroid Trajectory Parameters / V.E. Savanevich, A.B. Bryukhovetskiy, A.M. Kozhukhov, E.N. Dikov // Systemy Obrobky Informatsii:– Harkiv: HUPS, 2011. – Issue 2(92). – P. 137 – 144. .[in Russian]*
23. Ciurte, A., R. Danescu, *Automatic detection of MEO satellite streaks from single long exposure astronomic images, Proceedings of International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), Lisbon, Portugal, 2014 4, https://cv.utcluj.ro/amheos/tl_files/amheos/Docs/visapp_submitted_version.pdf/*
24. Zimmer, P.C., M.R. Ackermann, J.T. McGraw, *GPU-accelerated faint streak detection for uncued surveillance of LEO, Proceedings of AMOS Conference, Maui, Hawaii, 2013, https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/Optical_Systems/ZIMMER.pdf.*
25. Nir G., Zackay B., Ofek E.O. *Optimal and Efficient Streak Detection in Astronomical Images. The Astronomical Journal*, 156, 5:229, 2018.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СЕРИЯХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Кожухов А.М., Брюховецкий А.Б., Кожухов Д.М., Кучук Е.Ю.

Значительную часть информации о малых космических объектах, таких как астероиды, кометы или искусственные спутники Земли, включая космический мусор, получается путем анализа оптических наблюдений. Развитие светоприемной аппаратуры и вычислительной техники привело к появлению значительного количества методов автоматического обнаружения подобных объектов, как имеющих ненулевое видимое движение (в большинстве случаев используется линейная модель) на серии кадров.

В работе рассмотрены основные группы существующих сейчас методов автоматического (автоматизированного) обнаружения малых космических объектов, их особенности, приведены примеры оптических средств наблюдения, использующих те или иные описываемые методы.

Ключевые слова: оптические наблюдения космических объектов, методы обработки оптических наблюдений.

MODERN METHODS OF DETECTING MOVING SPACE OBJECTS ON SERIES DIGITAL IMAGES

Kozhukhov O.M., Bryukhovetsky O.B., Kozhukhov D.M., Kuchuk Y.Y.

A significant part of information about small space objects, such as asteroids, comets, or artificial satellites of the Earth, including space debris, is obtained by analyzing optical observations. The development of light-receiving equipment and computer technology has led to the emergence of a significant number of methods for the automatic detection of such objects as having non-zero apparent motion (in most cases a linear model is used) on a series of frames.

The paper considers the main groups of currently existing methods for automatic (automated) detection of small space objects, their features, examples of optical sensors using one or another of the described methods are given.

Key words: optical observations of small space objects, optical observations processing methods.