

НАДЕЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОЛЕТЯЩИХ ОБЪЕКТОВ ПЗС-СИСТЕМОЙ В МЕТЕОРНОЙ АСТРОНОМИИ

В. С. Жабин¹, А. К. Муртазов²

^{1,2} Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Рязань, Россия
¹ slavkaj@yandex.ru, ² akmurtazov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена вероятность автоматической регистрации метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) как показателя надежности регистрации быстропротекающих метеорных явлений. *Материалы и методы.* Проанализированы характеристики ПЗС-камер, установлены границы линейности фотометрических измерений блеска метеоров на единичных фреймах. *Результаты и выводы.* Приведены результаты оценки вероятности регистрации быстролетающих метеоров потока Персеиды ПЗС-системой для различных порогов регистрации. Вероятность регистрации достигает единицы, начиная с линейной части фотометрической кривой от приблизительно второй звездной величины и ярче, и резко уменьшается при приближении к порогу регистрации.

Ключевые слова: метеоры, ПЗС-камера, вероятность регистрации

Для цитирования: Жабин В. С., Муртазов А. К. Надежность регистрации быстролетающих объектов ПЗС-системой в метеорной астрономии // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 103–108. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13

RELIABILITY OF FAST-MOVING OBJECTS RECORDING BY CCD-SYSTEM IN METEOR ASTRONOMY

V.S. Zhabin¹, A.K. Murtazov²

^{1,2} Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Ryazan, Russia
¹ slavkaj@yandex.ru, ² akmurtazov@gmail.com

Abstract. *Background.* The probability of meteor automatic recording (facility response to the meteor appearance in the frame) as an indication of fast-moving meteor phenomena recording reliability is considered. *Materials and methods.* CCD cameras' characteristics are analyzed, as well as linearity borders of meteor magnitude photometric measurements are found. *Results and conclusions.* The results of assessing the probability of fast-moving Perseids meteors recording by the CCD system for different recording thresholds are presented. The recording probability comes up to 1 starting from the photometric curve linear part (approximately 2^m) and sharply reduces when coming up to the recording threshold.

Keywords: meteors, CCD-camera, detection probability

For citation: Zhabin V.S., Murtazov A.K. Reliability of fast-moving objects recording by CCD-system in meteor astronomy. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(1):103–108. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13

Введение

Наблюдения метеорных явлений – явлений сгорания частичек космической пыли различного происхождения в атмосфере – являются массовыми и достаточно широко распространенными. Регистрация таких событий производится различными методами, но наиболее удобным является их регистрация ПЗС-камерами (сокр. от «прибор с зарядовой связью»). Соответствующее программное обеспечение позволяет вырезать метеорные события из непрерывного видеопотока, сохраняя их для последующей обработки.

Метеорные явления являются быстропротекающим процессом. При геоцентрической скорости движения метеороидов до ≈ 72 км/с угловая скорость их движения на небесной сфере весьма высока. Например, геоцентрическая скорость частиц в наиболее известном метеорном потоке Персеиды составляет ≈ 60 км/с. На небесной сфере это соответствует 27 град/с, что предполагает определенные требования к системе обнаружения и регистрации метеоров.

В конечном счете вероятность обнаружения и регистрации метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) является показателем надежности регистрации метеорных явлений.

В целом проблема надежной регистрации быстролетающих объектов актуальна и находится в поле зрения специалистов в различных ее проявлениях [1–3].

Фотометрические характеристики метеорной камеры

Для мониторинга метеорных явлений наиболее распространенной в мире является 1/2" ПЗС-камера *Watec-902H* на базе матрицы *ICX-249AL ExView* компании *Sony* с размером пиксела 8.6 мкм (Г) x 8.3 мкм (В), чересстрочной разверткой и разрешением в телевизионном режиме 570 ТВЛ при освещенностях до 0,0001 лк [4–7]. Объективы различных фирм для 1/2" матриц создают изображения звезд как точечных объектов по критерию Найквиста не менее 3 пиксел поперек их полуширины [4, 5].

В отличие от различных систем усиления изображения (ЭОПов) для регистрации слабых объектов эти камеры не дают возможности регистрировать слабые метеоры с коротким следом, однако способны получать большие ряды наблюдений метеоров яркого и «среднего» блеска [8].

Для регистрации метеоров используется специально разработанное компьютерное обеспечение, позволяющее захватывать и сохранять кадры с метеорами, проводить обработку полученных изображений и далее определять координаты метеорных следов на небесной сфере, радианты метеорных потоков, траектории их полета над Землей, в конечном счете – орбиты метеороидов в Солнечной системе. Авторы регистрировали метеоры, используя программное обеспечение *UFO Capture* фирмы *Sonotaco* (http://sonotaco.com/soft/e_index.html).

При угловой скорости метеора 24° c^{-1} он будет зарегистрирован на одном кадре или двух фреймах. В оптической системе с 0,5" ПЗС и 8-мм объективом метеор будет зафиксирован ~ на 8 пикселах (рис. 1).

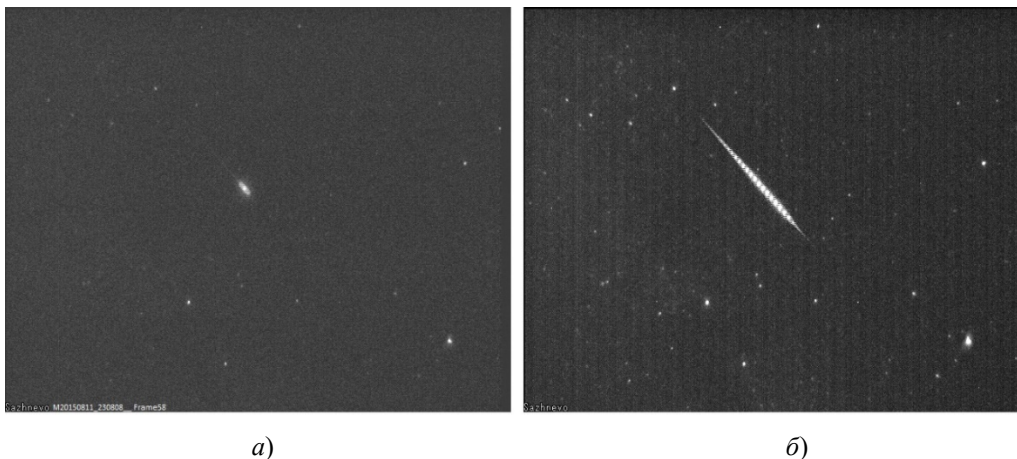


Рис. 1. Фиксация метеора: а – изображение метеора на одном фрейме; б – сложенное изображение этого метеора

На рис. 2 приведены результаты фотометрии неподвижных звезд на одном фрейме (усредненные измерения по 24 полукадрам) длительностью 0,02 с в программном софте *IRIS* [9] с круговой диафрагмой. Учитывались плоское поле, темновой ток и ток считывания. Фреймы получены покадровым разложением *avi*-файла, записанного *Wat-902H* с объективом *Computar HG0808AFCS* (поле зрения системы $45^\circ \times 34^\circ$).

Здесь представлено соотношение между звездной величиной неподвижных звезд (звездная величина уменьшается с увеличением их блеска) и их яркостью на изображении в виде отношения яркости звезды по отношению к окружающему фону (отношение «сигнал-шум»). Звездная величина в астрономии определяется из формулы Погсона как

$$\Delta m = -2,5 \lg \frac{S}{N}, \quad (1)$$

а то же отношение яркости объекта и фона (шума) на ПЗС-кадре как отношение

$$\Delta J = 20 \lg \frac{S}{N}. \quad (2)$$

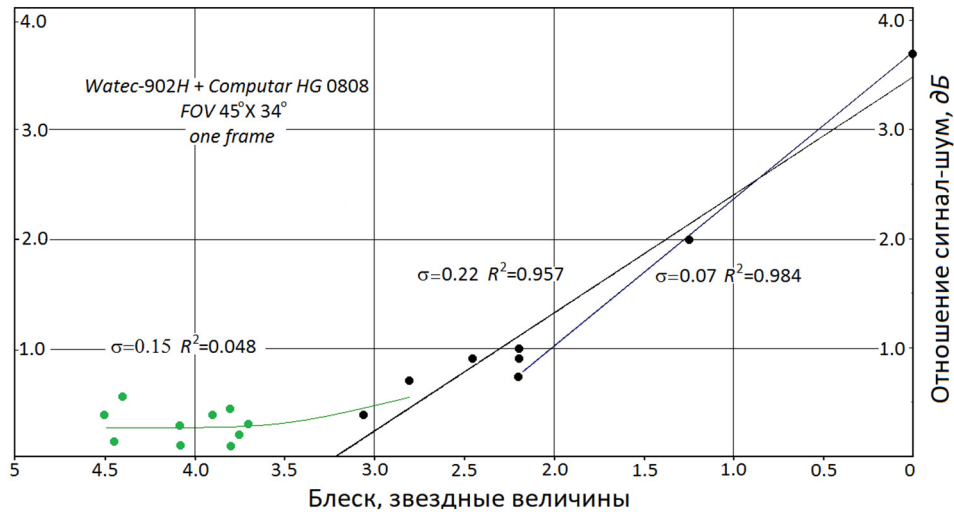


Рис. 2. Соотношение между блеском звезд и их яркостью на изображении

Анализ показывает, что для единичных фреймов яркость объектов слабее 3,5 звездной величины не зависит от блеска звезд. Она резко изменяется при переходе от фрейма к фрейму и создает сильный эффект мерцания слабых звезд. Линейная зависимость «яркость – звездная величина» появляется, начиная со второй звездной величины и ярче [10]. Поскольку рабочий диапазон камеры *Wat-902H*, заявленный производителем, составляет 50 дБ, линейность должна сохраняться, по крайней мере до звездной величины $\sim 4^m - 5^m$, которую имеют планеты и болиды.

Оценка вероятности регистрации метеорных явлений

При регистрации пролета метеора ввиду отсутствия данных о используемом в программе UFO алгоритме можно воспользоваться рядом упрощений и связать задачу оценки вероятности регистрации метеора с параметрами, которые возможно определить из наблюдений: относительный порог срабатывания и звездная величина обнаруживаемого объекта.

При решении задачи обнаружения подвижных объектов могут иметь место ошибки двух родов [11].

Ложная тревога – принятие автоматическим устройством ошибочного решения о наличии сигнала об изменениях в содержании кадра, когда такой сигнал отсутствует.

Пропуск сигнала возникает в том случае, если в результате взаимодействия сигнала с шумом на входе порогового устройства суммарное напряжение окажется меньше напряжения порога U_0 :

$$|S_i + N_i| \leq U_0. \quad (3)$$

Это соотношение применимо к нашему случаю пропуска регистрации быстрого объекта.

В нашем случае порогом срабатывания можно считать некое соотношение $h = \frac{S_0}{N_0}$, которое определяется из результатов мониторинга.

По критерию Неймана – Пирсона оптимальным решением считается такое, которое обеспечивает максимум вероятности правильного обнаружения P_D (или, что то же самое, минимум вероятности пропуска сигнала) при заданной вероятности ложной тревоги P_F . Решающее правило отличается только значением порога.

Считая, что шум на входе приемного устройства имеет нормальное распределение, характеристики обнаружения можно получить из, например, следующих уравнений [12]:

$$P_F = 1 - \Phi \left(\frac{h}{\sqrt{\frac{2S}{N}}} \right), \quad (4)$$

$$P_D = 1 - \Phi \left(\frac{h}{\sqrt{\frac{2S}{N}}} - \sqrt{\frac{2S}{N}} \right), \quad (5)$$

где $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt$ – интеграл вероятности.

На вероятность правильного обнаружения влияет скорость объекта наблюдения. В случае быстрых перемещений изображения наблюдаемого объекта фактическое время накопления, определяющее величину сигнала от движущегося объекта, уменьшается пропорционально скорости перемещения его изображения на матрице, что уменьшает отношение «сигнал–шум» и понижает вероятность регистрации быстрого объекта по сравнению с более медленным [11].

Авторами при проведении ПЗС-наблюдений метеорного потока Персеиды визуально регистрировался пролет метеора на экране монитора. Эти регистрации сравнивались с зарегистрированными программой UFO метеорами. Проведенные эксперименты позволили оценить вероятность регистрации метеоров различного блеска и скорости от величины порога срабатывания системы регистрации UFO. Порог срабатывания H устанавливался здесь вручную в зависимости от уровня фона неба на мониторе [13, 14].

На рис. 3 приведены результаты оценки вероятности регистрации быстролетающих метеоров потока Персеиды ($v \approx 60$ км/с) ПЗС-системой для различных порогов регистрации (срабатывания H). Вероятность регистрации достигает высоких значений начиная с линейной части фотометрической кривой ПЗС-камеры от приблизительно второй звездной величины и ярче и резко уменьшается при приближении к порогу регистрации. При высоком пороге регистрации система достаточно надежно регистрирует наиболее яркие объекты, сравнимые с ярчайшими звездами.

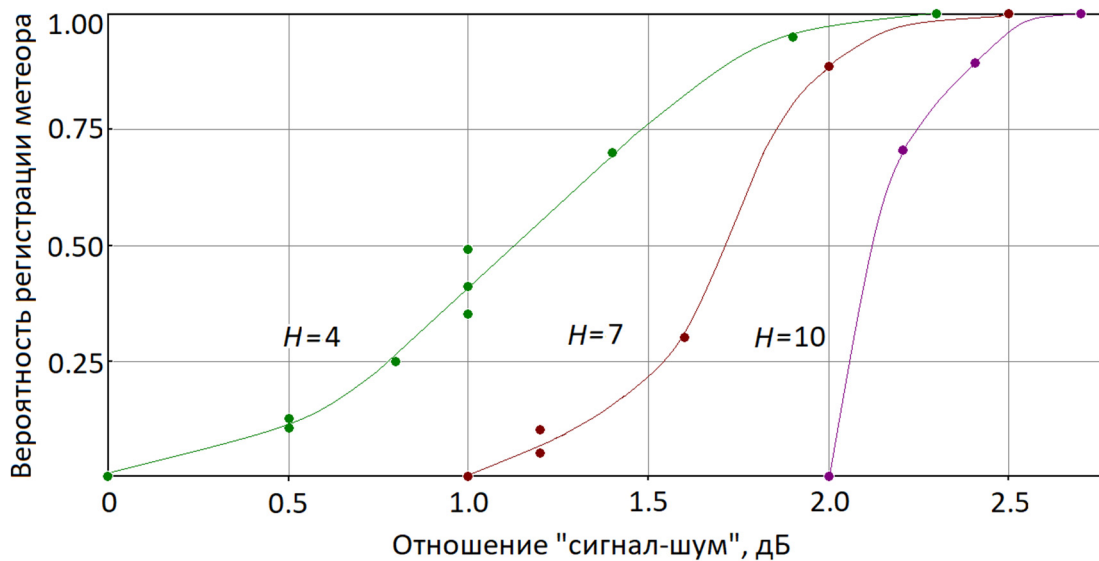


Рис. 3. Вероятность обнаружения метеора на одном фрейме при различных порогах срабатывания

Заключение

Вероятность обнаружения и регистрации метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) является показателем надежности регистрации метеорных явлений.

Линейность фотометрической характеристики оптико-электронной системы на базе камеры *Watec-902H* и 8-мм объектива *HG0808* начинается со второй звездной величины (≈ 1 дБ) при регистрации метеора на одном фрейме. Вероятность регистрации объекта в этой области может достигать высоких значений при правильном выборе порога регистрации системы, который зависит от условий наблюдений и фона неба. В общем, повышение порога регистрации снижает вероятность регистрации слабых объектов и сужает область обнаружения быстродвижущихся метеоров.

Список литературы

1. Миронов В. В. Сравнение систем регистраций космического мусора // Космические исследования. 1996. Т. 34, № 4. С. 414–419.
2. Миронов В. В. Методика оценки плотности космического мусора по данным бортовых регистрирующих систем // Космические исследования. 2003. Т. 41, № 2. С. 220–224.
3. Миронов В. В., Мухин А. В. Системный анализ столкновений мелкого космического мусора с космическим аппаратом // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2008. Т. 32, № 2. С. 320–325.
4. Миронов В. В., Муртазов А. К., Усовик И. В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства : монография. Рязань : Изд. Коняхин А.В. (Book Jet), 2018. 312 с.
5. Миронов В. В., Муртазов А. К. Ретроспектива проблемы космического мусора. Ч. 2. Мониторинг космического мусора естественного происхождения в околоземном пространстве методами метеорной астрономии // Космические исследования. 2021. Т. 59, № 1. С. 51–62. doi: 10.31857/S0023420621010064
6. Муртазов А. К. Мониторинг загрязнений околоземного пространства оптическими средствами. Рязань : РГУ имени С. А. Есенина, 2010. 252 с. doi: 10.13140/RG.2.1.3644.0721
7. Jenniskens P., Gural P. S., Dynneson L. [et al.]. CAMS: Cameras for All-sky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers // Icarus. 2011. Vol. 216. P. 40–61. doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.012
8. Koseki M., Ueda M., Shigeno Y. What is the difference between image intensifier and CCD meteors? III. How do meteor showers look like by image intensifiers and by CCD? // WGN. 2010. Vol. 38, iss. 5. P. 145–160.
9. Buil C. IRIS. Astronomical image processing software. 2010. URL: <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
10. Murtazov A. K., Efimov A. V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations // Proceedings of International Meteor Conference (Egmond, the Netherlands, June 2–5. 2016). 2016. P. 202–204. URL: <http://adsabs.harvard.edu – publication code 2016pimo.conf>
11. Андреев А. Л., Бурдова Н. А., Коротаев В. В. Алгоритм пространственно-временной селекции сигналов в адаптивных системах наблюдения за подвижными объектами // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 4. С. 13–17.
12. Болденков Е. Н. Обнаружение сигнала: алгоритмы обнаружения, статистические характеристики обнаружения. М. : МЭИ, 2014.
13. Бойкова Т. В., Григорьев А. С., Маколкин Д. В. [и др.]. Качество и надежность энергосистем малой мощности // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 28–37.
14. Бояркин Д. С., Асеев Е. А., Голушко Д. А. [и др.]. Протокол регистрации технического обслуживания трубопроводной арматуры // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 95–102.

References

1. Mironov V.V. Comparison of space debris registration systems. *Kosmicheskie issledovaniya = Space research*. 1996;34(4):414–419. (In Russ.)
2. Mironov V.V. Methodology for estimating the density of space debris based on data from on-board recording systems. *Kosmicheskie issledovaniya = Space Research*. 2003;41(2):220–224. (In Russ.)
3. Mironov V.V., Mukhin A.V. System analysis of collisions of small space debris with a spacecraft. *Trudy ISA RAN. Dinamika neodnorodnykh system = Proceedings of the ISA RAS. Dynamics of heterogeneous systems*. 2008;32(2):320–325. (In Russ.)
4. Mironov V.V., Murtazov A.K., Usovik I.V. *Sistemnye metody monitoringa okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva: monografiya = System methods of monitoring near-Earth space : monograph*. Ryazan': Izd. Konyakhin A.V. (Book Jet), 2018:312. (In Russ.)
5. Mironov V.V., Murtazov A.K. A retrospective of the problem of space debris. Part 2. Monitoring of natural space debris in near-Earth space by methods of meteor astronomy. *Kosmicheskie issledovaniya = Space Research*. 2021;59(1):51–62. (In Russ.). doi: 10.31857/S0023420621010064
6. Murtazov A.K. *Monitoring zagryazneniy okolozemnogo prostranstva opticheskimi sredstvami = Monitoring of near-Earth space pollution by optical means*. Ryazan': RGU imeni S.A. Esenina, 2010:252. (In Russ.). doi: 10.13140/RG.2.1.3644.0721
7. Jenniskens P., Gural P.S., Dynneson L. et al. CAMS: Cameras for All-sky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers. *Icarus*. 2011;216:40–61. doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.012
8. Koseki M., Ueda M., Shigeno Y. What is the difference between image intensifier and CCD meteors? III. How do meteor showers look like by image intensifiers and by CCD? *WGN*. 2010;38(5):145–160.
9. Buil C. *IRIS. Astronomical image processing software*. 2010. Available at: <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
10. Murtazov A.K., Efimov A.V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations. *Proceedings of International Meteor Conference (Egmond, the Netherlands, June 2–5. 2016)*. 2016:202–204. Available at: <http://adsabs.harvard.edu – publication code 2016pimo.conf>

11. Andreev A.L., Burdova N.A., Korotaev V.V. Algorithm of spatial and temporal selection of signals in adaptive systems for monitoring mobile objects. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* = *Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011;(4):13–17. (In Russ.)
12. Boldenkov E.N. *Obnaruzhenie signala: algoritmy obnaruzheniya, statisticheskie kharakteristiki obnaruzheniya* = *Signal detection: detection algorithms, statistical characteristics of detection*. Moscow: MEI, 2014. (In Russ.)
13. Boykova T.V., Grigor'ev A.S., Makolkin D.V. et al. Quality and reliability of low-power power systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):28–37. (In Russ.)
14. Boyarkin D.S., Aseev E.A., Golushko D.A. et al. Protocol of registration of maintenance of pipeline fittings. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):95–102. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вячеслав Сергеевич Жабин

аспирант,
сотрудник астрономической обсерватории,
Рязанский государственный университет
имени С. А. Есенина
(Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46)
E-mail: slavkaj@yandex.ru

Vyacheslav S. Zhabin

Postgraduate student,
researcher of the Astronomical Observatory,
Ryazan State University named after S.A. Yesenin
(46 Svobody street, Ryazan, Russia)

Андрей Константинович Муртазов

доктор технических наук, профессор,
директор астрономической обсерватории,
Рязанский государственный университет
имени С. А. Есенина
(Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46)
E-mail: akmurtazov@gmail.com

Andrey K. Murtazov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the Astronomical Observatory,
Ryazan State University named after S.A. Yesenin
(46 Svobody street, Ryazan, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.11.2024

Принята к публикации/Accepted 19.11.2024