

УДК 520.2.8

doi: 10.53816/23061456_2025_7–8_55

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВЕЗДНЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА БОРТОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

MODELING OF STAR FIELDS IN PROBLEMS OF SYNTHESIS OF ON-BOARD OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS

Канд. техн. наук А.К. Ключкин, А.В. Гаврилова, А.И. Ковтун

Ph.D. A.K. Klyuchkin, A.V. Gavrilova, A.I. Kovtun

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Статья рассматривает проблемы формирования моделей элементов фоноцелевой обстановки и их причины. Для заданных параметров оптико-электронной системы выведено выражение, позволяющее с помощью стандартного датчика равномерной случайной величины создавать выборки звезд, где распределение яркости соответствует реальным данным. Предложен метод моделирования некаталогизированного звездного фона («метод черпака»), основанный на равномерности распределения звезд в пространстве. Получено выражение для общего числа звезд в сфере заданного радиуса. Выражение учитывает неравномерность распределения звезд в Галактике. Математический анализ дал оптимальные выборки, отражающие реальное распределение звезд по блеску в поле зрения системы. При заданных допущениях уравнения звездной статистики получено выражение для общего числа звезд в сферической области пространства некоторого радиуса.

Ключевые слова: фоноцелевая обстановка, оптико-электронная система, синтез, звездная величина, блеск, поле зрения.

The article addresses the challenges of modeling elements of the background-target environment and their causes. For given parameters of an electro-optical system, an expression is derived that enables the creation of star samples using a standard uniform random variable sensor, where the brightness distribution aligns with actual astronomical data. A method for modeling uncataloged stellar background («scoop method») based on the assumption of uniform star distribution in space is proposed. An expression for the total number of stars within a spherical region of a certain radius is obtained. This expression accounts for the non-uniform distribution of stars in the Galaxy. Mathematical analysis provided optimal samples reflecting the actual distribution of stars by brightness within the system's field of view. Under the given assumptions of stellar statistics equations, an expression for the total number of stars in a spherical region of space of a certain radius is derived.

Keywords: background target environment, optical-electronic system, synthesis, magnitude, brightness, field of view.

Одной из важных проблем, возникающих при формировании моделей различных элементов фоноцелевой обстановки, является мо-

делирование звездного фона. Это обусловлено в большинстве случаев отсутствием или неполнотой информации о распределении звезд по их

блеску в поле зрения оптико-электронных систем (ОЭС) [1, 2] и в особенности относится к некаталогизированной составляющей звездного фона, при моделировании которой требуется привлечение методов звездной статистики, таких как [3, 4]:

– метод тригонометрических параллаксов (основан на наблюдении изменения положения звезды относительно более далеких объектов при наблюдении с разных точек орбиты Земли — расстояние вычисляется по формуле, где параллакс выражен в угловых секундах);

– метод цефеид (использует пульсирующие переменные звезды, которые имеют прямую связь между периодом переменности и абсолютной светимостью — измеряя период изменения яркости цефеиды, определяют ее абсолютную светимость, а затем вычисляют расстояние до звезды);

– метод стандартных свечей (основан на сравнении видимой звездной величины исследуемой звезды с известной абсолютной звездной величиной — в качестве стандартных свечей выступают объекты с известной светимостью, например сверхновые звезды I_a типа);

– метод пространственного распределения астрономических объектов, звездных скоплений и явлений по возрастам и временам жизни (выделяют два основных типа звездных скоплений, которые отличаются пространственной структурой, — шаровые скопления и рассеянные скопления);

– метод наибольшего правдоподобия;

– учет эффектов наблюдательной селекции;

– выделение членов скоплений по собственным движениям и лучевым скоростям.

Зададим следующие параметры ОЭС:

$D_{\text{вх}}$ — диаметр входного зрачка оптической системы ОЭС;

$\Phi_{\text{п}}$ — пороговый поток приемника оптического излучения;

2β — угловое поле зрения ОЭС.

Для обнаружения звезды в поле зрения оптической системы необходимо, чтобы оптический поток Φ от звезды превышал некоторый порог $\Phi_0 = \mu \cdot \Phi_{\text{п}}$, где μ — требуемое отношение сигнал/шум.

По формуле Погсона, которая связывает звездные величины небесных светил и создаваемые ими освещенности, потоку Φ_0 соответствует звездная величина m_0 [5]:

$$m_0 = -14,01 - 2,5 \lg \left[\frac{4\Phi_0}{\pi D_{\text{вх}}^2 \cdot 1,46 \cdot 10^{-3}} \right]. \quad (1)$$

Коэффициент зависимости $(-2,5)$ в формуле (1) выбран так, чтобы разности звездных величин, равной 5 (такова в среднем разность между самыми яркими и самыми слабыми видимыми невооруженным глазом звездами), соответствовало изменение освещенности в 100 раз.

Считается, что видимая звездная величина Веги приблизительно равняется нулю. От видимой звездной величины Веги отмеряются видимые звездные величины всех остальных объектов, как в положительную сторону (более тусклые), так и в отрицательную (более яркие).

Требуется определить преобразование $\hat{m} = f(\hat{R})$ стандартной размерной случайной величины $\hat{R} \in (0,1]$, позволяющее получить в поле зрения ОЭС 2β -выборку из $N(2\beta, m_0)$ звезд, блеск которых превышает m_0 . Причем распределение звезд в зависимости от их блеска должно удовлетворять реальным астрономическим данным.

Для решения данной задачи воспользуемся методом «черпака», суть которого заключается в допущении о равномерности распределения звезд в пространстве. Абсолютная звездная величина, характеризующая блеск астрономического объекта для наблюдателя, находящегося на некотором стандартном расстоянии от объекта, принимается одинаковой ($M_0 = \text{const}$).

Применительно к данному методу отношение числа звезд в некотором элементарном объеме к величине этого объема (или концентрация звезд n_0) есть также величина постоянная.

Запишем уравнение звездной статистики для звезд, обладающих сходными физическими характеристиками, и различные статистические зависимости между характеристиками звезд (уравнение Шварцшильда — формула, с помощью которой можно рассчитать интенсивность любого потока электромагнитной энергии после прохождения через нерассеивающую среду, когда все переменные фиксированы, при условии, что мы знаем температуру, давление и состав среды) в виде [6, 7]:

$$N(\omega, m_0) = \omega \int_{-\infty}^{m_0} \int_0^{r_0} n(r) \phi(M) r^2 dr dm, \quad (2)$$

где ω — телесный угол (часть пространства, которая является объединением всех лучей, выходящих из данной точки и пересекающих некоторую поверхность);

$n(r)$ — функция звездной плотности (это количество звезд, находящихся в единице объема пространства в данном направлении на расстоянии r);

$\varphi(M)$ — функция распределения звезд по их абсолютным звездным величинам — функция светимости (данная функция определяет количество (долю) звезд в единичном интервале абсолютных звездных величин).

При заданных допущениях

$$[n(r) = n_0, \varphi(M) = 1]$$

из уравнения (2) следует очевидное выражение для общего числа звезд в сферической области пространства радиусом r_0 :

$$N(2\pi, r_0) = \frac{4}{3} n_0 \pi r_0^3. \quad (3)$$

Тогда максимальная звездная величина звезды (соответствующая наиболее тусклым видимым объектам), доступная наблюдениям невооруженным глазом или с использованием того или иного оптического инструмента, составит [8, 9]

$$m(r_0) = M_0 - 5 + 5 \lg r_0. \quad (4)$$

Таким образом, решив уравнение (4) относительно r_0 и подставив его в выражение (3), получим число звезд, блеск которых превышает m_0 , на всей небесной сфере

$$N(2\pi, m_0) = \frac{4}{3} n_0 \pi \cdot 10^{C(m_0 - M_0 + 5)}, \quad (5)$$

а также в поле зрения ОЭС 2β

$$N(2\beta, m_0) = \frac{2\pi(1 - \cos \beta)}{3} n_0 \cdot 10^{C(m_0 - M_0 + 5)}, \quad (6)$$

где коэффициент $C = 0,6$.

Для определения искомой функции $f(R)$ воспользуемся теоремой о преобразовании случайной величины [10], из которой следует

$$R = \bar{f}(m) = F_m(m) = \frac{N(2\beta, m)}{N(2\beta, m_0)}, \quad (7)$$

где $F_m(m)$ — функция распределения случайной величины $\hat{m}$;

$\bar{f}(m)$ — функция обратная $f(m)$.

Значит, согласно соотношениям (6) и (7) искомая функция $f(R)$ однозначно может быть определена в виде

$$\hat{m} = f(\hat{R}) = \frac{\lg \hat{R}}{C} + m_0. \quad (8)$$

В уравнении (6) $M_0 = -1,01$, $n_0 = 1,01 \cdot 10^{-3}$; эти значения могут быть уточнены по результатам реальных астрономических наблюдений [1–4].

В силу неравномерности распределения звезд в Галактике (что противоречит исходному постулату рассматриваемого подхода) коэффициент $C = 0,6$ [см. формулы (5), (6), (8)] необходимо выбирать наименьшим.

Наилучший результат анализа соответствия выборок звезд по данным был получен при $C = 0,5$.

Таким образом, на основе полученного преобразования (8) нетрудно сформировать выборку звезд $\hat{m}$ объема $N(2\beta, m_0)$, блеск которых превышает m_0 , отражающую распределение звезд по блеску в поле зрения ОЭС адекватно реальным астрономическим данным.

Список источников

1. Гофман В.Э., Ракчеев Д.П., Толстиков А.С. Оценка вероятности многомерного распознавания изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 1991. № 3. С. 68–75.
2. Локтин А.В., Островский А.Б. Методы звездной статистики: учеб. пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 256 с.
3. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.
4. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1975. 432 с.
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1962. 564 с.
7. Ключкин А.К. Решающее правило, обеспечивающее требуемую вероятность выбора

наиболее опасного космического объекта из множества наблюдаемых космическим аппаратом мониторинга околоземного космического пространства. 2023. Вып. 12. С. 29–38.

8. Ключкин А.К., Арсеньев В.Н., Ядренкин А.А. Метод выбора целевого объекта по ограниченным измерениям физически неоднородных признаков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2021. Том 64. Вып. 10. С. 799–805.

9. Ключкин А.К., Захаров В.Л., Смирнов Д.В. Метод селекции орбитальных объектов по результатам обработки неоднородной измерительной информации // Известия института инженерной физики. Серпухов: Институт инженерной физики, 2022. Вып. 1. С. 90–93.

10. Ключкин А.К., Мацкевич В.И., Слатова Е.В. Методика обеспечения соответствия параметров бортовых оптико-электронных средств заданным требованиям // Авиакосмическое приборостроение. 2023. Вып. 7. С. 3–7.

References

1. Hofman V.E., Rakcheev D.P., Tolstikov A.S. Estimation of Multidimensional Image Recognition Probability // Izv. Vuzov. Priborostroenie. 1991. No 3. Pp. 68–75.

2. Loktin A.V., Ostrovsky A.B. Methods of stellar statistics: textbook. Yekaterinburg: Ural University Press, 2018. 256 p.

3. Kuzmin S.Z. The foundations of the theory of digital processing of radar information. Moscow: Sov. Radio, 1974. 432 p.

4. Kurosh A.G. Course of higher algebra, Moscow: Nauka, 1975. 432 p.

5. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook of Mathematics for engineers for engineers and university students. Moscow: Nauka Publ., 1986, 544 p.

6. Wentzel E.S. Theory of probability. Moscow: Fizmatgiz, 1962. 564 p.

7. Klyuchkin A.K. The decisive rule that ensures the required probability of selecting the most dangerous space object from the set observed by the near-Earth space monitoring spacecraft // Aerospace instrumentation. 2023. Issue 12. Pp. 29–38.

8. Klyuchkin A.K., Arsenyev V.N., Yadrenkin A.A. A method for selecting a target object based on limited measurements of physically heterogeneous features // News of higher educational institutions. Instrument engineering. Saint Petersburg: ITMO University, 2021. Vol. 64. No 10. Pp. 799–805.

9. Klyuchkin A.K., Zakharov V.L., Smirnov D.V. Method of selection of orbital objects based on the results of processing heterogeneous measurement information // Proceedings of the Institute of Engineering Physics. Serpukhov: Institute of Engineering Physics, 2022. Issue 1. Pp. 90–93.

10. Klyuchkin A.K., Matskevich V.I., Slatova E.V. Methodology for Ensuring that the Parameters of Onboard Optical and Electronic Devices Meet the Set Requirements // Aerospace Instrumentation. 2023. Issue 7. Pp. 3–7.