

Методический подход к распознаванию космических объектов по информации о трендовых составляющих фотометрических кривых блеска

Е. В. Благодаренко, А. С. Кошкаров, С. В. Логунов, А. С. Харитонов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. Рассмотрен методический подход к распознаванию космических объектов по некоординатной информации, представленной фотометрическими кривыми блеска при наличии информации о трендовых составляющих.

Ключевые слова: космический объект; метод максимального правдоподобия; фотометрическая кривая блеска

I. ВВЕДЕНИЕ

В отличие от баллистических и аэродинамических целей принципиальных ограничений на выбор формы искусственных космических объектов (КО) – космических аппаратов (КА) не существует. Технологические ограничения связаны в основном с этапом вывода на орбиту, в силу чего крупногабаритные КА в большинстве своем имеют протяженную форму, близкую к цилиндрической. Однако после вывода КА на рабочую орбиту и в процессе орбитального полета форма может быть изменена за счет развертывания солнечных панелей, антенн и специального оборудования. В настоящее время ведущие космические державы – Россия, США и Китай – планируют создание, развертывание и запуск в эксплуатацию многоспутниковых космических систем с количеством космических аппаратов вплоть до сотен или тысяч, а в среднесрочной перспективе – до десятков тысяч [1, 2].

Под динамическими некоординатными признаками понимаются тип и параметры движения КА вокруг центра масс. В околоземном космическом пространстве преобладают два основных типа движения – стабилизированное по трем осям и ротационное. Большинство действующих КА двойного назначения имеют активную или пассивную (гравитационную) стабилизацию с ориентацией главных осей инерции по осям подвижной орбитальной системы координат.

Ротационное движение является наиболее распространенным в околоземном космическом пространстве и типично для нестабилизированных и окончивших активное существование КА, ракет-носителей, фрагментов запуска, осколков и деталей. В установившемся режиме такое движение является вращением вокруг оси максимального момента инерции с медленно изменяющейся скоростью и направлением оси вращения в пространстве под действием внешних возмущающих моментов (аэродинамического, гравитационного и магнитного).

Многообразие видов движения КО вокруг центра масс, широкий диапазон возможных скоростей вращения и ориентаций в пространстве порождает многообразие видов фотометрических реализаций. Одним из информационных признаков КО, извлекаемым из некоординатной информации при решении обратной фотометрической задачи, является величина периода фотометрической кривой блеска. Выявление регулярного периода и трендовых составляющим изменения блеска КО может свидетельствовать о наличии стабилизации у объекта и о методах его стабилизации. Определение периода и тенденций его изменения сводится к выявлению скрытой периодичности случайного процесса по реализациям фотометрических кривых блеска.

II. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Задача недопущения орбитальных инцидентов требует, прежде всего, обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых систем с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого космического объекта (КО) как с учетом движения КА по баллистическим траекториям, так и более сложных с точки зрения наблюдения КА, движущихся с включенными двигателями [3, 4].

Обеспечение космической деятельности осуществляется с использованием сети наземных средств наблюдения за КО, работающих в оптическом и радиоволновом диапазонах спектра [5]. Для обработки и анализа информации о КО может использоваться как координатная, так и некоординатная, в частности, фотометрические кривые блеска космических объектов [6].

Как уже отмечалось, при недостаточной плотности массива измерений

$$I_k^* = [I_k^*(X_{k1}), I_k^*(X_{k2}), \dots, I_k^*(X_{kNk})]^T, k = 1, \dots, M, \quad (1)$$

могут быть, получены лишь эталонные значения медленно изменяющейся трендовой составляющей функции $I_k(X)$. При этом необходима предварительная обработка измерений блеска $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$ наблюдаемого КО. Задача предварительной обработки состоит в том, чтобы получить значения трендовой составляющей $I_{1T}^*, I_{2T}^*, \dots, I_{nT}^*$ функции блеска наблюдаемого аппарата в узлах X_1, X_2, \dots, X_n и, таким образом, сгладить вариации

измерений блеска наблюдаемого аппарата, которые заведомо сглажены при получении эталонных значений трендовой составляющей по данным измерений массива (1).

Предварительная обработка измерений $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$ с целью получения сглаженных значений $I_{1T}^*, I_{2T}^*, \dots, I_{nT}^*$ производится так же, как при получении эталонных значений [6]. В рассматриваемом случае при распознавании могут использоваться такие же функции сглаженных измерений, как и ранее рассмотренные, при замене в них величин $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$ на величины $I_{1T}^*, I_{2T}^*, \dots, I_{nT}^*$ и диагональной матрицы на недиагональную ковариационную матрицу нормального закона распределения вероятностей случайных величин $I_{1T}^*, I_{2T}^*, \dots, I_{nT}^*$.

Однако в рассматриваемом случае для распознавания КО нет необходимости доводить вычисления до получения по данным массива (1) эталонных значений $\hat{I}_{k1}, \hat{I}_{k2}, \dots, \hat{I}_{kn}$, а по данным измерений $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$ – величин $I_{1T}^*, I_{2T}^*, \dots, I_{nT}^*$. Для этого достаточно вычислить коэффициент $c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kn}$ полинома [6]

$$I_k(X_1) = \sum_{j=1}^{m_k} c_{kj} \varphi_j(X) \quad k=1, \dots, M \quad (2)$$

определяющего значения $\hat{I}_{k1}, \hat{I}_{k2}, \dots, \hat{I}_{kn}$ и коэффициенты $c_{T1}, c_{T2}, \dots, c_{Tm_k}$ полинома, аппроксимирующего функцию измерения блеска наблюдаемого КО.

Плотность распределения вероятностей коэффициентов $c_{T1}, c_{T2}, \dots, c_{Tm_k}$ при условии наблюдения k -го КО определяется выражением:

$$\begin{aligned} W(C/k) &= (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| R_{kc^*} + R_{kc} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \\ \exp\left[-\frac{1}{2} (C^* - \hat{C}_k)^T (R_{kc^*} + R_{kc})^{-\frac{1}{2}} (C^* - \hat{C}_k)\right] &= \\ &= (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| R_{kc^*} + R_{kc} \right|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r_{kji}^{-1} (c_i^* - \hat{c}_{ki})(c_j^* - \hat{c}_{kj})\right] \end{aligned} \quad (3)$$

где $C^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_m^*)^T$ – вектор коэффициентов полинома (2), определяемых по результатам измерения блеска наблюдаемого КО в узлах X_1, X_2, \dots, X_n ; R_{kc^*} – ковариационная матрица ошибок определения компонентов вектора C^* при условии, что наблюдается k -ый КО; $\hat{C}_k = (\hat{c}_{k1}, \hat{c}_{k2}, \dots, \hat{c}_{km})^T$ – вектор эталонных коэффициентов полинома (2), определяемых: с использованием измерений массива (1), которые выполнены во всех узлах заданной окрестности совокупности узлов X_1, X_2, \dots, X_n ; R_{kc} – ковариационная матрица ошибок определения компонентов вектора \hat{C}_k ;

r_{kji}^{-1} – элемент матрицы $(R_{kc} + R_{kc})^{-\frac{1}{2}}$; $\left| R_{kc^*} + R_{kc} \right|$ – определитель матрицы $(R_{kc^*} + R_{kc})$; m – число координатных функций полинома (2).

Если ввести обозначения:

$$\begin{aligned} Y_k^* &= (y_{k1}^*, y_{k2}^*, \dots, y_{km}^*)^T, y_{ki}^* = C_{ki}^* - \hat{C}_{ki}, i=1, \dots, m \\ R_{kc^*} + R_{kc} &= R_{ky^*}, W(C^*/k) = W(Y_k^*), \end{aligned}$$

то условная плотность вероятности (3) запишется в виде

$$\begin{aligned} W(Y_k^*) &= (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| R_{ky^*} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \\ \exp\left[-\frac{1}{2} (Y_k^*)^T (R_{ky^*})^{-1} Y_k^*\right] &= \\ &= (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| R_{ky^*} \right|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r_{kji}^{-1} y_{ki}^* y_{kj}^*\right] \end{aligned} \quad (4)$$

При использовании метода максимального правдоподобия выдается решение о том, что наблюдается q -ый КО, $q=1, \dots, m$, если выполняется условие

$$W(Y_q^*) = \max W(Y_k^*). \quad (5)$$

Вместо правила (4) можно использовать эквивалентное ему правило, при котором выдается решение о том, что наблюдается q -ый КО, если

$$\ln W(Y_q^*) = \max_k \ln W(Y_k^*). \quad (6)$$

В условиях, когда, кроме M известных КО, может наблюдаться неизвестный аппарат, может оказаться более удобным следующий алгоритм реализации метода максимального правдоподобия. При этом алгоритме производится поэтапное попарное сравнение значений функций правдоподобия (Y_k^*) для двух различных k , каждый раз предваряемое линейным преобразованием векторов, входящих в эти функции. После каждого этапа, тот КО, для которого функция правдоподобия оказалась меньше функции правдоподобия другого, участвующего в сравнении аппарата, исключается из последующих этапов сравнения, т. е. считается не наблюдаемым.

При рассмотренном варианте реализации метода максимального правдоподобия это правило основано на применении широко используемого критерия согласия χ^2 . Используя табличные данные для этого закона, можно установить пороговое значение W_{k0} , при котором вероятность ε превышения величиной χ^2 правой части равенства

$$W(Y_k^*) = (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| \Lambda_k^{-\frac{1}{2}} \Phi_k^T \right| \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (Z_{ki}^*)\right] \quad \text{будет}$$

достаточно малой, например $\varepsilon=0,01$. Если окажется, что это все же произошло, то выдается решение о том, что наблюдается неизвестный аппарат. Вероятность того, что это решение будет ошибочным, т. е. на самом деле наблюдается q -ый аппарат, равна ε , т. е. $\varepsilon=0,01$.

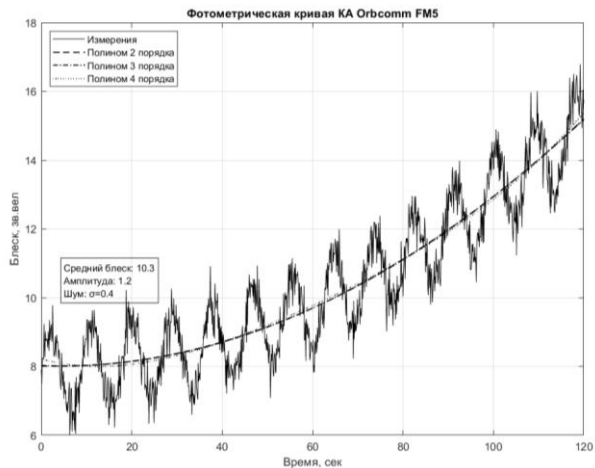


Рис. 1. Фотометрическая кривая блеска КА Orbcomm FM5 от 29 декабря 2021

На основе этого авторами была по реальным данным КА Orbcomm FM5 (кривых приведенного блеска до и после разрушения спутника) проверена работоспособность предложенного алгоритма. В частности, рис. 1 показывает кривую блеска от 29 декабря 2021 года с периодическими изменениями. На основе аппроксимации полиномами различной степени получены данные о соответствии объекта заданному эталону (логарифм правдоподобия: 8.0, критерий χ^2 : наблюдаемое = 1200.0, критическое = 1314.8).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенный методический подход к распознаванию космических объектов по трендовым составляющим фотометрических кривых блеска космических объектов позволяет сократить время решения обратной фотометрической задачи и идентификации КА, обеспечивая требуемое качество сопровождения КО в условиях значительной заселенности орбит космических систем типа «орбитального слоя».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Глобальная спутниковая система Starlink [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Starlink>. (Дата обращения: 15.02.2025).
- [2] Статистика Starlink [Электронный ресурс]. – URL: <https://planet4589.org/space/stats/star/starstats.html>. (Дата обращения: 15.02.2025).
- [3] Суханов С.А., Шаргородский В.Д., Шилин В.Д. Система контроля космического пространства. М.: Правда, 2011. 206 с.
- [4] Калюта А.Н. Глобальный мониторинг космической обстановки – важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере // Военная мысль. М., 2017. Вып. № 9. С. 5-11.
- [5] Благодыренко Е.В., Шосталь В.Ю. Исследование парадокса закона больших чисел при совместной обработке существенно неравноточных измерений // 76-я НТК СПб НТОРЭС, СПб., 2021. С. 98-100.
- [6] Благодыренко Е.В., Кошкарлов А.С., Шосталь В.Ю., Шосталь В.Ю. Метод формирования фотометрических эталонов космических объектов // 78-я НТК СПб НТОРЭС, Санкт-Петербург, 2023. С. 122-125.