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

Е. В. Благодыренко, 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 объектов искусственных космических (KO) космических аппаратов (KA) 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 панелей, солнечных антенн и специального оборудования. В настоящее время ведущие космические державы – Россия, США и Китай – планируют создание, развертывание запуск и 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, ракетносителей, 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 фотометрических реализаций. вилов 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, обеспечения прежде всего, 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 KА, 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

$$I_{k}^{*} = [I_{k}^{*}(X_{k1}), I_{k}^{*}(X_{k2}), ..., I_{k}^{*}(X_{kNk})]^{T}, k = 1, ..., M, (1)$$

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

узлах $X_1, X_2, ..., X_n$ 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 $I_1^*, I_2^*, ..., I_n^*$ с целью получения сглаженных значений $I_{1T}^{*}, I_{2T}^{*}, ..., I_{nT}^{*}$ 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 $I_1^*, I_2^*, ..., I_n^*$ на величины $I_{1T}^{*}, I_{2T}^{*}, ..., I_{nT}^{*}$ И диагональной матрицы на недиагональную ковариационную матрицу нормального закона распределения вероятностей случайных величин $I_{1T}^{*}, I_{2T}^{*}, ..., I_{nT}^{*}$.

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

$$\boldsymbol{I}_{k}(X_{1}) = \sum_{j=1}^{m_{k}} c_{kj} \varphi_{j}(X) \quad k = 1, ..., M$$
(2)

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

Плотность распределения вероятностей коэффициентов $C_{T1}, C_{T2}, ..., C_{Tm_k}$ при условии наблюдения k-го KO определяется выражением:

$$W(C/k) = (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| R_{kc^*} + R_{kc} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp[-\frac{1}{2}(C^* - \hat{C}_k)^{\mathrm{T}}(R_{kc} + R_{kc})^{-\frac{1}{2}}(C^* - \hat{C}_k)] =$$

$$= (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| R_{kc^*} + R_{kc} \right|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} r_{kii}^{-1}(c_i^* - \hat{C}_{ki})(c_j^* - \hat{C}_{kj})]$$
(3)

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

Если ввести обозначения:

 Y_{ν}^{*}

$$= (y_{k1}^*, y_{k2}^*, ..., y_{km}^*)^T, y_{k1}^* = C_{ki^*} - C_{ki}, i = 1, ..., m$$
$$R_{kc^*} + R_{kc^*} = R_{kv^*}, W(C^* / k) = W(Y_k^*),$$

то условная плотность вероятности (3) запишется в виде

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

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

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

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

$$\ln W(Y_q^*) = \max_{k} \ln W(Y_k^*).$$
 (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

$$W(Y_k^*) = (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \left| \Lambda_k^{-\frac{1}{2}} \Phi_k^T \right| \exp[-\frac{1}{2}] \sum_{i=1}^m (Z_{ki}^*)]$$
 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.=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 предложенного работоспособность алгоритма. B от частности, рис. 1 показывает кривую блеска 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 наблюдаемое = 1200.0, χ^2 : 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

- 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., Кошкаров А.С., Шосталь В.Ю. Метод формирования фотометрических эталонов космических объектов // 78-я НТК СПб НТОРЭС, Санкт-Петербург, 2023. С. 122-125.