стали не наблюдается (рис. 1). Для стали 07X25H13 в изломе во всем исследуемом диапазоне температур наблюдается преимущественно вязкая составляющая. При понижении температуры размер чашек вязкого разрушения уменьшается. Это свидетельствует о снижении пластичности стали и коррелирует с полученными результатами по оценке механических характеристик (табл. 1).

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации «Оценка хладостойкости и изучение механизмов разрушения металлов полученных на основе 3D-печати для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в условиях Арктики и Крайнего Севера»

1. Стрижало, В.А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций [Текст]/ В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, В.А. Стрельченко [и др.]; Отв. Ред. Писаренко Г.С.; АН УССР. Ин-т проблем прочности.- Киев: Наук. Думка, 1990.- 232с.
2. Семашко, Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, Б.Н. Марьин [и др.]; под ред. Н.А.Семашко.- М.: Машиностроение, 2002.-240 с.
3. Разработка цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием методов машинного обучения и численного моделирования Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Галкин А.А., Клочкова Н.С. Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67-2. С. 55-62.
4. Пат. 2671152 Рос. Федерация: МПК G01N 29/14. Способ обработки сигнала акустической эмиссии.

Лавров В.В.¹, Лучкина М.В.², Рындин К.Ю.³, Рындин Ю.Г.¹, Тестов А.В.¹, Тюрин В.С.⁴
Алгоритм оценки орбитальных параметров по совокупности угловых измерений

¹ПАО Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»

²ООО «Компания АСТРА»

³ОАО «Российские космические системы»

⁴Акционерное общество «Астрономический научный центр»
 (Россия, Москва)

doi: 10.18411/trnio-12-2021-145

Аннотация

Рассмотрен метод определения орбитальных параметров околоземных космических объектов (КО) по совокупности угловых измерений, содержащих аномальные “замеры”. Начальную оценку параметров орбиты предлагается искать по трём угловым измерениям с использованием модифицированного метода Гаусса, а дальнейшую обработку – с использованием метода поиска М-оценок параметров. Имитационным моделированием найдена оценка качества работы синтезированного алгоритма. Метод предназначен для обнаружения некаталогизированных космических объектов с одновременной оценкой их орбитальных параметров по результатам оптических обзоров.

Ключевые слова: аномальные измерения, М-оценка параметров, орбитальные параметры, определение орбит, метод Гаусса, угловые измерения.

Abstract

A method for determining the orbital parameters of near-Earth space objects (SO) from a set of angular measurements containing anomalous “measurements” is considered. It is proposed to search for the initial estimate of the orbit parameters by three angular measurements using the modified Gaussian method, and further processing – using the search method for M-estimates of parameters. An estimate of the quality of the synthesized algorithm is found by imitation modeling. The method is designed to detect uncataloged space objects with a simultaneous assessment of their orbital parameters based on the results of optical surveys.

Keywords: abnormal measurements, M-assessment of parameters, orbital parameters, determination of orbits, Gauss method, angular measurements.

Введение

В последние годы в отечественной и зарубежной практике для целей контроля космического пространства на низких орбитах все чаще применяются обзорные оптико-электронные средства. При этом в течение одной ночи одни и те же участки небесной сферы наблюдаются несколько раз. В результате наблюдений получают наборы коротких треков КО, заданных в виде набора значений угловых координат в местной инерциальной системе координат эпохи J2000 [1] (значений прямого восхождения α и склонения δ в соответствующие моменты времени).

На практике с телескопов в обработку поступают измерения, сгруппированные в проводки продолжительностью в среднем ~ 10 минут и состоящие из 7–10 измерений. Достаточно часто необходимо решать довольно сложную задачу: по совокупности треков получить первое приближение вектора состояния некаталогизированного КО, уточнить его после поиска измерений, согласующихся с полученным вектором состояния, когда какие-либо сведения об орбите наблюдаемого КО априори отсутствуют. Для ее решения используются алгоритмы, построенные на методе Гаусса и его модификациях [2–4]. В работе [5] предложен алгоритм, позволяющий в зоне двойного обзора определить первоначальные значения орбитальных параметров (вектора состояний). Последующее уточнение орбитальных параметров в рамках модели аддитивных гауссовых шумов реализуется с использованием методов наименьших квадратов или принятия статистических решений [6].

В настоящей работе предлагается алгоритм обнаружения параметров орбиты и уточнения вектора её состояния. Структура алгоритма синтезируется с использованием метода формирования М-оценок неизвестных параметров [7]. При таком подходе удаётся вести обработку исходной статистики при наличии в её структуре “аномальных” замеров.

Выбор модели наблюдений и обоснование структуры алгоритма их обработки

В самом общем виде задача может быть поставлена следующим образом:

в результате наблюдений получена совокупность исходных данных $T_n = \{(\alpha_i, \delta_i; t_i) : i = \overline{1, n}\}$, где α_i, δ_i – склонение и прямое восхождение в местной системе отсчета J2000 на момент времени t_i ;

требуется найти координаты $|r(t)\rangle$ и скорости $|v(t)\rangle$ КО в любой момент t в произвольной системе координат (СК).

Здесь и далее введены обозначения: $|a\rangle$ – вектор столбец и $\langle a|$ вектор строка соответствующих параметров.

Пусть траектория движения однозначно определяется вектором состояния $|\beta\rangle = \begin{pmatrix} |r\rangle \\ |v\rangle \end{pmatrix}$, соответствующим некоторому моменту времени; $\alpha_i = f_i(|\beta\rangle)$ и $\delta_i = g_i(|\beta\rangle)$, где $f(|\beta\rangle)$ и $g(|\beta\rangle)$ – заданные функции, структура которых определяется преобразованиями между СК, подробно рассмотренными в [1], и решением системы дифференциальных уравнений движения КО на заданный момент времени (задача Коши); будут учитываться следующие факторы.

- Гравитационное поле Земли с учетом его несферичности.
- Гравитационное притяжение Луны.
- Гравитационное притяжение Солнца.
- Атмосферное торможение, рассчитываемое по одной из моделей атмосферы, с использованием индексов солнечной активности и геомагнитной возмущенности.
- Световое давление.

Обозначим через $|\theta_i(|\beta\rangle)\rangle = \frac{|f_i(|\beta\rangle)\rangle}{|g_i(|\beta\rangle)\rangle}$, а через $|X_i\rangle$ – случайный вектор i -го измерения, который задается соотношением $|X_i\rangle = |\theta_i(|\beta\rangle)\rangle + |\varepsilon_i\rangle$.

Считаем, что фоновая компонента $|\varepsilon_i\rangle$ распределена по нормальному закону с нулевым средним и корреляционной матрицей W_i $N(0, W_i)$, а также $|\varepsilon_i\rangle$ статистически независимы при разных угловых измерениях.

Точное решение уравнений движения с учётом всех действующих сил затруднительно. На практике ограничиваются определённой моделью движения, в которой учитываются конкретный состав упомянутых выше факторов, и связанным с нею алгоритмом прогнозирования (прогнозом $\{P_k: k = \overline{1, K}\}$). Он используется при расчёте положения КО на i -й момент времени. В общем случае модель движения нелинейна относительно $|\beta\rangle$, и прогнозирование движения КО осуществляется с использованием численных методов [8].

По этой причине, а также с учетом условий формирования отдельных измерений более справедлива модель наблюдения $|X_i|P_k\rangle = (1 - p_\vartheta) * |\theta_i(|\beta\rangle|P_k)\rangle + p_\vartheta * |\vartheta_i\rangle + |\varepsilon_i\rangle$, где $|\vartheta_i\rangle$ - случайная величина с неизвестным законом распределения, а $p_\vartheta \ll 1$ – вероятность её появления.

Таким образом, задачу Коши приходится решать в условиях, когда нам неизвестны начальное значение вектора состояния, вероятность и распределение “аномальных” замеров. Будем решать задачу поэтапно с использованием базового алгоритма обработки информации в таких условиях, диаграмма деятельности которого приведена на рис. 1.

Рисунок 1. Диаграмма деятельности алгоритма обнаружения орбиты при наличии аномальных измерений в исходной статистике

Дадим краткую характеристику реализации приведённого на диаграмме алгоритма обнаружения вектора состояния орбитальных параметров КО и его уточнения.

Для поиска начального вектора состояния из числа возможных алгоритмов [2–5] используем алгоритм, предложенный в работе [2].

Дальнейшую обработку информации проводим с помощью алгоритмов поиска М-оценок [7]. Функционал качества для поиска оценки оптимального вектора параметров $|\beta\rangle$ задается соотношением

$$r(n, |\beta\rangle) = \sum_{i=1}^n \rho(r_i(\beta)); r_i(\beta) = |X_i - \theta_i|,$$

а сама оценка находится путём решения экстремальной задачи на минимум

$$|\beta^*\rangle = \min_{|\beta\rangle} r(n, |\beta\rangle).$$

Здесь $\rho(r_i(\beta))$ – функция потерь, которая, как правило, представляет собой монотонную невозрастающую функцию модуля невязки $r_i(\beta)$, выбор конкретного вида которой достаточно широк.

Это обстоятельство позволяет синтезировать набор алгоритмов обработки совокупности независимых одинаково распределённых данных, с неизвестным законом распределения. В частности, нас интересует решение задачи при возможном наличии в статистике $|X_i\rangle, i = \overline{1, n}$; аномальных измерений.

На этапе уточнения вектора в качестве функции потерь $\rho(\Delta_i(\beta))$ выберем квадратичную функцию $\rho(\Delta_i(\beta)) = \langle X_i - \theta_i | W_i | X_i - \theta_i \rangle; i = \overline{1, n}$, где W_i – положительно определённая матрица. Известно, что если распределение $|X_i\rangle$ нормальное, а W_i совпадает с обратной корреляционной матрицей, то статистика $\rho(\Delta_i(\beta))$ является статистикой, соответствующей методу максимума правдоподобия [7] при наличии n независимых наблюдений. Такой выбор позволяет свести задачу поиска предварительной оценки $|\beta\rangle$ к её поиску с использованием нелинейного обобщённого метода наименьших квадратов (НОМНК) [9], т. е. НОМНК является частным алгоритмом поиска М-оценок неизвестного параметра. Многоканальность обработки на данном этапе связана как с наличием нескольких начальных оценок вектора состояния, так и с совокупностью алгоритмов прогнозирования.

Известно, что НОМНК чувствителен к наличию аномальных измерений в исходной статистике. Поэтому на этапе проверки их наличия в остаточной статистике $\hat{r}(n, |\beta^*\rangle)$ при найденных оценках параметров $|\beta^*\rangle$ проведём ранжировку невязок $\hat{r}^2 = \{\hat{r}_i^2(|\beta^*\rangle); i = \overline{1, n}\}$ по возрастанию их значений. При априори выбранном пороге c_n принимаем решение о наличии в исходной статистике аномальных объектов. Значение c_n следует выбирать таким образом, чтобы гарантировать проверку наличия аномальности в статистике $\hat{r}^2$. Например $c_n = S(\hat{r}(n, |\beta^*\rangle))$, где $S=\sigma$ используется для обозначения среднеквадратического отклонения (СКО).

При установлении факта аномальности решается задача удаления в исходной статистике T_n аномальных замеров. При этом анализируется остаточная статистика $\hat{T}_{n0\text{ст}} = \{\hat{r}_i(|\beta^*\rangle); i = \overline{1, n}\}$ с функцией потерь $\rho(r_i(\beta))$ вида $\rho(r_i(|\beta^*\rangle)) = \max_j \|\hat{r}_i^2(|\beta^*\rangle) - \hat{r}_j^2(|\beta^*\rangle)\|$, где $\|a\|$ – модуль a . За аномальные замеры принимаются наблюдения, которые не попадают в 3σ доверительный интервал. Они удаляются из T_n статистики. Уточнённая статистика и вектор состояний $|\beta^*\rangle$ подаются на вход алгоритма НОМНК для их уточнения.

По завершению вычислительного процесса из числа отобранных решений $\{\hat{T}_{n0\text{ст}}(k); k = \overline{1, K}\}$ выбирается наилучший по критерию, в структуре которого учитывается количество оставшихся измерений и значение невязки, приходящееся на одну степень свободы.

Кратко остановимся на структуре частных алгоритмов.

Характеристика алгоритма выбора вектора начального состояния

Метод построения орбиты Кеплера по 3 принадлежащим ей угловым измерениям был впервые предложен Гауссом. Нами использовалась программная реализация синтезированного в [2] алгоритма, структура которого ориентирована на обнаружение орбит неизвестных КО искусственного происхождения. В указанной работе приведено детальное

описание алгоритма, а также стратегия поиска решения, проведены исследование его свойств, области применения и сходимости. Читателей, подробно интересующихся этой проблемой рекомендуем обратиться к данной работе. Здесь приведём основные особенности алгоритма.

В качестве исходных данных для рассматриваемого метода используются упорядоченные по времени возрастания три угловых измерения. Каждое из этих измерений описывается следующими параметрами: вектор, определяющий положение наблюдательного пункта в пространстве; единичный вектор, направленный вдоль линии визирования оптического измерения; время измерения. Все вектора заданы в инерциальной геоцентрической системе отсчета (например, J2000).

Исходная информация используется для вычисления двух коэффициентов n_1 , n_2 с помощью приведенных в [2] соотношений. Предложенный алгоритм поиска решений основан на триангуляции Делоне в плоскости параметров n_1 , n_2 .

Триангуляции Делоне присущи следующие свойства. Во-первых, триангуляция Делоне является единственной для заданного набора вершин. Во-вторых, триангуляция Делоне обладает максимальной суммой минимальных углов всех своих треугольников среди всех возможных триангуляций.

При разработке алгоритма использовались ограничения на наклонные дальности, которые характерны для искусственных объектов. Учет этих ограничений позволил создать алгоритм построения области возможных решений для таких объектов. Использование этого алгоритма позволяет без выполнения сложных вычислений убедиться в отсутствии решений в случаях, когда измерения принадлежат к разным объектам, что весьма важно для задач обнаружения неизвестных космических объектов.

По сравнению с известными модификациями метода Гаусса применение предложенного алгоритма имеет ряд очевидных преимуществ, в частности:

решения могут быть получены при отсутствии начального приближения с использованием метода Гаусса;

алгоритм позволяет находить несколько возможных решений поставленной задачи.

Алгоритм уточнения вектора состояния

Пусть $\det(W_i) \neq 0, i = \overline{1, n}$. Тогда весовой обработкой статистику $|r_i\rangle = |X_i - \theta_i\rangle$; $i = \overline{1, n}$ можно привести к виду $|\tilde{r}_i\rangle = W_i^{-1/2} |X_i - \theta_i\rangle$; $i = \overline{1, n}$, где $W_i = 1$. В этих переменных алгоритм вычисления оценки $|\beta\rangle$ имеет вид

$$|\nabla\beta\rangle = -2 \sum_{i=1}^n \tilde{r}_i * \nabla_{\beta} \tilde{r}_i = \sum_{i=1}^n \tilde{r}_i * \nabla_{\beta} \theta_i = |0\rangle,$$

где $|\nabla\beta\rangle$ – вектор размерности S , для s компоненты $\nabla\beta_s$ которого значение $\nabla_{\beta} \tilde{r}_{is}$ вычисляется на каждом шаге итерации по формуле

$$\nabla_{\beta} \tilde{r}_{is} = \sum_{j=1}^M \partial\theta_{ij} / \partial\beta_s$$

Система уравнений для поиска оптимальной оценки $|\beta^*\rangle$ нелинейна. Оценка $|\beta^*\rangle$ находится итеративно численными методами. В [9] показано, что требуемая оценка может быть найдена с помощью следующего алгоритма. Введем матрицу H частных производных размера $2n \times S$, значения которой вычислены в точках $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, 2}$ и вектор $|\beta_u\rangle$, полученный на u -й итерации. k -я строка H при u -й итерации, где $k = 2(i - 1) + (j - 1)$, вычисляется по формуле $H(u) = (\nabla_{\beta} \theta_{i,j}(\beta)|_{\beta=\beta_u})$. Тогда значения невязок $|r(u + 1)\rangle$ и вектора приращений $|\Delta\beta(u + 1)\rangle = |\beta_{u+1}\rangle - |\beta_u\rangle$ вычисляются с помощью следующей системы нормальных линейных уравнений

$$H^T(u)H(u)|\Delta\beta(u + 1)\rangle = H^T(u)|r(u)\rangle; |r(u + 1)\rangle = |r(u + 1, \beta(u + 1))\rangle.$$

Остановка алгоритма осуществляется при достижении заданного числа итераций или справедливости неравенства $(|r(u)\rangle - |r(u + 1)\rangle) \geq c_n$.

Легко видеть, что если элементы матрицы H постоянны, то мы приходим к оценке параметров линейной модели методом ОМНК.

Алгоритм выделения аномальных измерений

Оценка оптимального значения невязки находится с помощью критерия $r_{med}^2 = \min_{r_k^2} \max_j \|r_i^2(|\beta^* >) - r_j^2(|\beta^* >)\|$ и совпадает с медианой остатков $\tilde{r}^2$.

Применяя аналогичный критерий для статистики абсолютных отклонений невязок от медианной оценки $T_{nMed} = \{r_i^2(|\beta^* >) - r_{med}^2 : i = \overline{1, n}\}$, находим медианную оценку СКО $S(r_{med}^2) = \sigma(r_{med}^2) = c(F)med(|\beta_i^* - \beta_{med}^*|)$ (так называемую MAD оценку [7]). Здесь $c(F)$ – дополнительный коэффициент, значение которого зависит от априори известной ожидаемой функции распределения F статистики T_{nMed} . В частности, для нормального распределения имеем $c(F) = 1.483$. Существенно, пороговая точка ε^* предлагаемых алгоритмов оценки параметров, физический смысл которой – допустимый относительный уровень загрязнения исходной статистики аномальными измерениями [7], равна 0.5.

Для нас существенно, что вышеупомянутое свойство пороговой точки сохраняется и в пространстве конечномерных векторных параметров $|\beta >$ для векторной медианы (геометрическая медиана) $|\beta_{med}^* >$ с функцией распределения $F_{|\beta >}$ [7]. Под геометрической медианой $|\beta_{med}^* >$ принято понимать медиану Тьюки (центральную точку), заданную соотношением

$|\beta_{med}^* > = \operatorname{argmin}_{|y >} \max_{x_i} \sum_{i=1}^n \|x_i - y\|$ (здесь и далее через x и y обозначены вектора $|\beta >$), где $\|*\|$ – заданная метрика в виде модуля невязок, а рекуррентный алгоритм её поиска задается в виде

$$|y_{j+1} > = (\sum_{i=1}^n |x_i > / \|x_i - y_j\|) / (\sum_{i=1}^n 1 / \|x_i - y_j\|); j = \overline{1, n}.$$

Результаты

В процессе проведения имитационного моделирования решалась задача оценки возможностей синтезированного алгоритма и качества формируемых им показателей, и характеристик в процессе обработки “загрязнённых” угловых измерений при использовании различных алгоритмов прогнозирования (прогнозов), а также с учётом качества отдельных угловых измерений.

В качестве прогнозов использовались кеплеровский, численный [1] и SGP4-SDP4 [10], для которых введем условные обозначения Пр₁, Пр₂, Пр₃.

Для контроля качества решений введём следующие оцениваемые показатели и характеристики:

- p – вероятность успешного восстановления вектора состояния при допустимом среднем уровне остаточной невязки, вычисляемая по формуле $p = n/N$, где n – количество успешно восстановленных векторов состояния; N – общее количество испытаний (прогонов);
- $e_{нев} = (\alpha_e, e_m, \beta_e)$ – совокупность параметров, характеризующих поведение невязок между исходной статистикой угловых измерений и соответствующих векторов состояния, в составе:
 $e_m = med(e_i : i = \overline{1, n})$ – медианная оценка параметра (невязки, робастной оценки среднего в загрязненной выборке);
 $\alpha_e = e_m / (\min_i(e_i))$ – отношение медианы к минимальной оценке параметра (физический смысл – показатель удаленности минимальной оценки от медианы);
 $\beta_e = (\max_i(e_i)) / e_m$ – отношение максимальной оценки параметра к медиане (физический смысл – показатель загрязнённости выборки при значении ≥ 3).
- $\rho_{пр} = (\alpha_\rho, \rho_m, \beta_\rho)$ – характеристика качества прогноза, компоненты которой вычисляются по выше приведённым формулам. Исходная статистика вычисляется с использованием соотношения $\rho_i = \max_k \| |r_i(k|Пр) > - |r_i(k|O) > \| : k = \overline{1, K(i)}$, где: $|r_i(k|*)$ – вектор положения КО в, например, J2000 в k -й момент времени в i -й проводке; $K(i)$ – количество угловых измерений в i -й проводке; индекс “Пр” относится к выбранному прогнозу, а индекс “О” к опорной орбите.

Считаем, что приведённый состав показателей, с одной стороны необходим для оценки качества функционирования синтезированного алгоритма, а с другой – достаточен, чтобы сформировать о нём (качестве) общее представление.

Движение КО на опорной орбите прогнозировалось с помощью точной модели движения, основанной на численном интегрировании уравнений движения. При этом учитывались все реальные возмущения включая нецентральность и неравномерность гравитационного поля Земли, воздействие гравитации Луны и Солнца и сил светового давления. В качестве начального вектора состояния при реализации имитационных реализаций выбрано состояние КО NORAD ID = 23439; (наименование “RADIO ROSTO” (“RS-15”)) с параметрами, взятыми с сайта CelesTrak [11].

Совокупность угловых измерений формировалась в ночное время на двух суточном интервале наблюдений с учетом случайного временного интервала функционирования средства и рассчитанных интервалов прохождения КО через зону контроля пространства. Аддитивные ошибки угловых измерений имитировались с использованием распределения $N(0, \sigma)$, а их аномальные значения – с использованием нормального распределения при $\sigma_a = 3\sigma$. Такой выбор гарантирует требуемый уровень достоверности аномальности. Выбранное значение пороговой точки, которое использовалось при реализации “аномальных” измерений с помощью равномерного распределения из интервала $[0, 1.0)$, $\varepsilon^* = 0.2$. Для каждого варианта исследования, который характеризуется выбранным прогнозом и дисперсией ошибки, обрабатывалось 10000 реализаций.

После их обработки с помощью конкретного прогноза восстановлена характеристика вероятности успешного обнаружения орбиты наблюдаемого КО по угловым измерениям в рассматриваемых в работе условиях. Характеристика приведена на рис. 2.

На приведённом рисунке значения дисперсий случайных ошибок угловых измерений приведены в логарифмическом масштабе с основанием логарифма десять. Анализ представленной информации позволяет сделать вывод, что область значений дисперсий, при которых алгоритм остаётся работоспособен, ограничена значением $\sigma \lesssim (100 \div 150)$ угловых секунд, а устойчивая область $\sigma \leq 10$ угл. сек. При этом ранжировка предпочтения использования конкретных алгоритмов прогноза следующая: Пр2, Пр3, Пр1.

В процессе функционирования синтезированного алгоритма накоплена статистика предложенных в работе интегральных показателей качества. В таблице приведены их медианные оценки, вычисленные по совокупности первоначальных значений (к введённым обозначениям добавлен нижний символ “н”: em→emn) и совокупности результирующих значений (добавлен нижний символ “р”: rm→rmp). Принятые сокращения слов в таблице: “Алг”→“Алгоритм”; “Мед” →“Оценка медианы”.

Рисунок 2. Вероятность успешного обнаружения орбиты в зависимости от дисперсии угловых измерений, приведённой в логарифмическом масштабе

Таблица

Медианная оценка интегральных показателей качества

Алг	Мед	Значения СКО угловых измерений							
		-0.5	1	5	10	20	50	100	150
Пр ₂	$e_{тн}$	57.2	5.9e3	8.0e7	4.4e8	5.2e8	9.7e7	3.5e8	4.25e8
	$e_{тр}$	4.8e-6	5.29	5.31	5.31	5.32	5.32	5.32	5.32
	$\rho_{тн}$	8.58	2.7e5	3.8 e5	4.4 e5	7.4e5	3.8 e6	6.2e6	7.5 e6
	$\rho_{тр}$	0.04	4.54	23.2	46.6	93.0	233.0	467.0	602.0
Пр ₃	$e_{тн}$	2.e7	8.0e7	1.1e8	1.4e8	1.9e8	5.0e8	6.3e8	6.5e8
	$e_{тр}$	8.4e-5	2.84	2.82	2.82	2.82	2.81	2.81	2.81
	$\rho_{тн}$	7295	1.5e4	1.8e4	2.3e4	5.4e4	1.1e5	4.9e5	7.3e5
	$\rho_{тр}$	0.04	7.61	58.4	76.9	154.0	885.0	970.0	1056.0
Пр ₁	$e_{тн}$	2.e7	5.0e7	6.13e7	7.66e7	9.9e7	5.5e8	6.8e8	7.5e8
	$e_{тр}$	6.4e-4	5.17	5.17	5.18	5.19	5.19	5.19	5.19
	$\rho_{тн}$	9295	1.5e4	3.6e5	4.2e5	6.3e5	3.2e4	6.9e5	9.3e5
	$\rho_{тр}$	0.24	9.61	76.8	82.6	104.0	759.0	1170.0	1256.0

Анализ приведённых в таблице данных позволяет сделать вывод о достаточно оптимистичных оценках характеристик качества функционирования алгоритма в ситуации, когда удаётся обнаружить неизвестную орбиту КО. В частности, динамический диапазон изменения отношения значений входных и выходных медианных оценок невязок $\geq 10^6$ при $\sigma \leq 10$ угл. сек, а соответствующее значения показателя прогноза $\geq 10^5$.

На рис. 3 в логарифмическом масштабе приведены гистограммы сгруппированных значений предложенных показателей качества в следующей последовательности $\{\alpha_e, \beta_e, \alpha_\rho, \beta_\rho$; при $\sigma = \sigma_i; i = \overline{1,12}\}$. Их оценки получены по совокупности накопленных реализаций при выбранном значении σ_i . Дисперсии отдельных групп синхронизированы с их приведенными значениями в таблице. Отдельные группы отделены друг от друга интервалом нулевых отметок. Принятый состав информации в группе: параметр→набор последовательности прогнозов при их вычислении {Пр2; Пр3; Пр1}.

Рисунок 3. Гистограммы поведения отношения показателей качества. Вверху: слева – статистика по исходным данным; справа – по результирующим данным. Внизу – по результирующим данным при выбранном пороге. Дополнительное описание см. в тексте

Анализ представленной информации в верхней строке рисунка подтверждает предыдущий вывод. С другой стороны наблюдаются ситуации появления больших отклонений значений показателей от нулевого уровня в результирующих данных (см. правую гистограмму). Детальный анализ их поведения после пороговой обработки полученной статистики с одновременной сменой знака у значений показателей α_e и α_p показал, что выбросы связаны с минимальным граничным значением интервала локализации анализируемой статистики. Этот вывод подтверждается приведёнными в нижней строке на рис. 3 гистограммами, где указан максимальный порог сохранения отклонений показателей от медианного значения.

В результате проведённого анализа следует сделать следующие выводы.

1. Окончательная оценка вектора состояния при условии обнаружения орбиты восстанавливается достаточно качественно при любом выбранном прогнозе.
2. Вместе с тем, вероятность обнаружения орбиты невысока даже при малых значениях дисперсий угловых измерений (низком уровне аномальных измерений). Последнее инициализирует поиск путей модификации алгоритма. В частности, интерес представляет удаление из вычислительного процесса аномальных угловых измерений на первом шаге итерационного процесса.

Заключение

В работе синтезирован алгоритм обнаружения неизвестной орбиты КО по совокупности “загрязнённых” угловых измерений, полученных обзорным оптико-электронным средством на двух суточном интервале наблюдения.

Алгоритм включает в себя совокупность трёх последовательных частных алгоритма.

На первом шаге обработки находится совокупность возможных начальных векторов состояния с использованием предложенного в [2] метода.

В дальнейший обработке используется метод формирования М-оценок найденного вектора состояния.

На этапе его уточнения при выбранном алгоритме прогнозирования движения КО используется итерационный алгоритм формирования вектора состояния, в основу которого положен нелинейный обобщённый метод наименьших квадратов. По завершению итерационного процесса по состоянию невязок находится совокупность аномальных измерений, которая удаляется из исходной статистики, и уточняется значение вектора состояния.

Проведено исследование качества функционирования алгоритма с использованием имитационного моделирования и трёх алгоритмов прогнозирования: кеплеровского и численного прогноза, а также SGP4 в широком диапазоне изменения аддитивных ошибок угловых измерений. При этом в качестве опорной орбиты использовалась орбита реального КО с NORAD ID = 23439 и значение пороговой точки, равное 0.2.

Полученные результаты показали удовлетворительное качество восстановления вектора состояния при любом выбранном прогнозе в ситуации первоначального обнаружения орбиты.

Дальнейшая модификация алгоритма может состоять в оптимизации места выявления аномальных измерений и удаления их из дальнейшей обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект № 19-07-00225А и 20-07-00122А.

1. Прогноз орбитального движения космического аппарата. Численная модель. Электронный ресурс <https://docplayer.com/26524205-Prognoz-orbitalnogo-dvizheniya-kosmicheskogo-apparata-chislennaya-model.html>

2. Самотохин А.С., Хуторовский З.Н. Метод первоначального определения параметров околоземных орбит по трем угловым измерениям. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2014, № 44, 31 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-44>
3. Шефер В.А. Новый метод определения орбиты по двум векторам положений, основанный на решении уравнений Гаусса. Астрономический вестник, 2010, т. 44, № 3, с. 273–288.
4. Boykov V.F., Khutorovsky Z.N., Sbytov N.N. An Algorithm of Preliminary HEO Orbital Parameters Determination Based on Three Optical Positional Measurements. Sixth US/Russian Space Surveillance Workshop. August 22–26, 2005. Proceedings. P.K. Seidelmann, V.K. Abalakin, eds. St. Petersburg, 2005. URL: http://lfvn.astronomer.ru/report/0000015/ssw_5_1/index.htm
5. Кустодов А.Ю., Павлов В.П. Определение траекторий космических объектов по оптическим измерениям в зонах двойного обзора с наземных пунктов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1659>
6. Колесса А.Е., Пругло А.В., Равдин С.С. Восстановление орбит по угловым измерениям, Радиотехника, №10, 2005.
7. Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния; пер. с англ. М.: Мир, 1989, 512с., ISBN 5-03-001003-3.
8. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965. – 537 с.
9. Электронный ресурс https://ru.abcdef.wiki/wiki/Non-linear_least_squares
10. Электронный ресурс https://en.wikipedia.org/wiki/Simplified_perturbations_models
11. Электронный ресурс <https://celestrak.com/NORAD/elements/>

Лавров В.В.¹, Рындин К.Ю.², Тюрин В.С.³

Идентификация угловых измерений с известными векторами состояния

¹ПАО Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»

²ОАО «Российские космические системы»

³Акционерное общество «Астрономический научный центр»

(Россия, Москва)

doi: 10.18411/trnio-12-2021-146

Аннотация

На основе байесова подхода синтезирован алгоритм идентификации угловых измерений, формируемых в обзорной оптико-электронной системе, с совокупностью векторов орбитального состояния известных (каталогизированных) космических объектов (КО). Предложена характеристика качества решения задачи идентификации в виде количества КО, о которых может быть принято положительное решение об идентификации по анализируемому угловому измерению в зависимости от требуемого уровня доверия. Имитационным моделированием с использованием приведённых на сайте <https://celestrak.com/NORAD/elements/> данных получены примеры характеристик идентификации. Алгоритм предназначен для идентификации поступивших угловых измерений с векторами состояний каталогизированных КО.

Ключевые слова: алгоритм идентификации, вектор состояния орбитальных параметров, характеристика идентификации, угловые измерения.

Abstract

Based on the Bayesian approach, an algorithm for identifying angular measurements formed in a survey optoelectronic system with a set of orbital state vectors of known (cataloged) space objects (SO) is synthesized. A characteristic of the quality of the identification problem solution is proposed in the form of the number of SO with which a positive decision can be made on identification according to the analyzed angular measurement, depending on the required level of confidence. Simulation modeling using the data provided on the website <https://celestrak.com/NORAD/elements/> has obtained examples of identification characteristics. The algorithm is designed to identify incoming angular measurements with the state vectors of cataloged SO.

Keywords: identification algorithm, vector of a condition of orbital parameters, characteristic of identification, angular measurements.