

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КАТАЛОГОВ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© М. В. Бровко, А. В. Голубек, И. А. Емельянова, П. Г. Хорольский

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Стаття присвячена постановці задачі та розробці методики оцінки якості будь-якого каталогу параметрів руху космічних об'єктів на прикладі дослідження даних НАСА, вільно поширюваних в глобальній мережі Internet.

Оценка космической обстановки требует знания параметров движения космических объектов, которые на практике сводят в каталоги [4]. Наиболее полными каталогами наблюдаемых КО располагают США и РФ. Отмечено, что параметры орбит одних и тех же КО в разных каталогах различаются [1]. Основной причиной такого различия являются погрешности определения параметров орбит КО, включающие ошибки измерений, оценивания и прогнозирования на момент представления данных в каталоге.

Первые две группы ошибок определяют погрешность начальных условий движения (НУД). Ошибка прогноза определяется применяемым методом расчета траектории КО, в частности используемой моделью движения, и ошибками параметров самой модели. Все рассмотренные погрешности независимы.

Особенностью каталога КО может быть представление данных, адаптированных к некоторой модели движения, например с целью повышения точности прогноза по его данным. В этом случае указанные погрешности, вообще говоря, не могут рассматриваться как независимые.

Для проведения корректных расчетов на основании какого-либо каталога необходимо знать качество его данных, в нашем случае — их точность. Для этого необходим набор эталонных данных как базы для сравнения. Без них оценка качества будет неточной, особенно если исследуемые данные адаптированы к какой-то модели, поскольку необходимо учесть также и неизвестную погрешность этой модели.

Поэтому в настоящей статье ставится задача разработки методики оценки качества произвольного каталога параметров орбит КО при условии отсутствия эталонных данных и при неизвестной

методологии его формирования. Такая задача актуальна для Украины, которая имеет несомненные интересы в космосе и располагает на настоящий момент только параметрами орбиты своего первого спутника «Сич-1».

Оценкам качества РФ и США посвящены работы [1—3], однако в них предполагается обработка первичных данных известного для исследования происхождения.

Оценка качества данных каталога КО регулярно проводится в системах контроля космического пространства [1, 4]. Однако только создатели каталога в состоянии точно определить качество его данных, поскольку опираются на первичные измерения наблюдательных пунктов. Поэтому задача в рассматриваемой постановке еще требует решения.

Пусть даны параметры орбит КО — время  $t_i$  и соответствующий ему вектор  $\{\Pi_i\}$  параметров орбиты  $i$ -го КО,  $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  — число каталогизированных объектов. Неповторяющаяся совокупность идентификаторов КО и параметров их орбит известной структуры, соответствующая определенному источнику данных и приведенная на некоторый момент времени, образует каталог. Качество параметров орбиты есть качество их каталога. Необходимо оценить качество параметров орбиты.

Рассматривая  $\Pi_i(t_i)$  как обобщенное измерение  $i$ -го КО [2], в основу методики оценки качества естественно положить статистическую обработку таких измерений и качество оценивать по величинам систематического смещения (выборочного математического ожидания)  $M$  и среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  [2, 3], а также корреляции невязок прогнозных и соответствующих моменту  $t_i$  значений из каталога компонентов вектора  $\Pi_i$ .

$$\Delta \Pi_i(t_i) = P(\Pi_i(t_i - \Delta t_i), \Delta t_i) - \Pi_i(t_i), \quad (1)$$

где  $P(\cdot)$  — функция прогноза вектора параметров орбиты  $\Pi_i(t_i)$  вперед на интервал времени  $\Delta t_i$ ,  $\Delta t_i$  — интервал времени между смежными данными каталога.

Напомним, что эти оценки, как отмечалось выше, характеризуют качество собственно данных  $\Pi_i(t_i)$ , но не содержат информации о модели, используемой для получения приведенных данных. При отсутствии эталонных (более точных, желательно на порядок) данных возможно получить статистические характеристики самих данных, но не каталога в целом.

Для решения поставленной задачи необходимо привлечение всей доступной информации, в том числе и косвенной. Так, в составе данных каталога НАСА, доступного через сеть Internet, нет параметров солнечной активности  $F_{10.7}$  и геомагнитной напряженности  $A_p$ , необходимых для расчета плотности верхней атмосферы. Естественно, возникают следующие предположения:

— либо в каталоге НАСА приведены вторичные данные, полученные в результате согласования некоторой упрощенной модели движения с первичными параметрами движения, полученными в результате уточнения начальных условий движения по данным измерительных пунктов;

— либо авторами каталога предполагается использование недостающих данных из другого источника, но тогда необходимо знание модели верхней атмосферы, использующей эту информацию, а также модели ее учета при прогнозе движения при уточнении начальных условий движения.

Для разрешения этой дилеммы воспользуемся дополнительной информацией — свободно распространяемой в Internet программой прогноза движения КО TRAKSTAR, специально ориентированной на рассматриваемые каталоги. Она не требует данных о солнечной активности, но имеет, как показано ниже, высокую точность. Это говорит в пользу вывода о вторичном характере данных.

Для получения более весомых аргументов привнесем во внимание, что суточные изменения параметров солнечной активности и геомагнитной напряженности имеют весьма существенную случайную составляющую. Это обстоятельство позволяет путем сопоставления прогнозов движения рассматриваемого КО, выполненных с применением различных моделей верхней атмосферы, определить характер учета солнечной активности: если модель атмосферы использует медленно изменяющиеся значения  $F_{10.7}$  и  $A_p$ , то гипотезу о вторичном характере данных каталога можно считать доста-

точно обоснованной. В этом случае необходимо проведение структурной оптимизации путем перебора моделей атмосферы с разной степенью использования динамики изменения  $F_{10.7}$  и  $A_p$ , значения которых будут критерием для принятия решения. Ниже рассмотрим эти вопросы более подробно.

Для определения модели движения, согласованной (имеющей минимальное отклонение) временной последовательностью  $\Pi_i(t_i)$ , воспользуемся наличием достаточно большой временной последовательности каталогов данных КО. Это можно осуществить путем проведения известной в баллистическом навигационном обеспечении космических аппаратов [2] операции согласования моделей движения, заключающейся в адаптации параметров модели к временному ряду измерений оптимизацией некоторого критерия I:

$$\{P_j, \bar{S}_j\} = \min_{j=1, K, i=1, m} I(\Delta \Pi_i^j(t_i)), \quad (2)$$

$P_j, \bar{S}_j$  — функция прогноза и ее параметры для  $j$ -й модели движения,  $K$  — количество рассматриваемых моделей движения,  $m$  — количество измерений временного ряда,  $i, j$  — индексы порядковых номеров КО в каталоге и номера модели соответственно.

Последующие особенности методики связаны:

- с видом критерия оптимизации I при адаптации моделей;
- с методом адаптации (оптимизации);
- с выбором ограниченного множества адаптируемых моделей движения КО;
- с известными конкретными особенностями каталога КО.

Очевидно, что критерий оптимизации должен иметь точностной характер.

Оценки точности  $M$  и  $\sigma$  образуют векторный критерий, который неудобен для практического применения, поэтому его необходимо привести к скалярному виду, что можно реализовать двумя путями:

- принять

$$I = I_1 = \sigma, \quad (3)$$

а систематику  $M$  учитывать в качестве постоянных поправок. Однако этот подход оправдывает себя при достаточно точных оценках  $M$ , которые будут зависеть, как показано далее, от достаточно плохо прогнозируемых параметров солнечной активности;

— определить  $I$  как функцию  $M$  и  $\sigma$ , что оправданно при недостаточной точности определения  $M$ , и в нашем случае в качестве критерия принята средняя ошибка:

$$I = I_2 = \sqrt{M^2 + \sigma^2}. \quad (4)$$

Выбор критерия определяется опытом исследования и эвристическими соображениями. Так как критерий  $I_2$  применяется к каждой составляющей вектора параметров движения, то его векторный характер не устранен, хотя размерность и уменьшена вдвое.

Поскольку на практике важно контролировать точность нескольких компонентов  $\Pi_i$ , и к тому же их состав и важность зависят от конкретных решаемых задач, то имеет смысл сохранить покомпонентные оценки критерия:

$$I_{ji} = I_j(i), \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad j = 1 \cup 2. \quad (5)$$

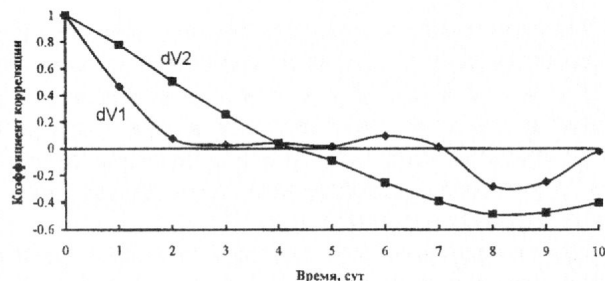
Для принятия решения следует упорядочить  $I_{ji}$  по важности компонентов  $\Pi_i$  и решение о выборе модели, если оно не очевидно, принимать на эвристических основаниях.

Выбор моделей движения КО определяется характером и параметрами их орбит, а также привлечением дополнительной априорной информации — и он будет касаться выбора числа учитываемых гармоник гравитационного потенциала Земли (ГПЗ), модели атмосферы, учета лунно-солнечных возмущений и светового давления. В зависимости от объема каталога могут возникнуть дополнительные требования в части ограничения потребных ресурсов ЭВМ (памяти и быстродействия).

В качестве метода адаптации достаточно использовать прямой перебор вариантов, поскольку множество рассматриваемых моделей дискретно и ограничено. Множество моделей может быть ограничено путем проверки на однородность выборки по  $M$  и  $\sigma$  с использованием  $t$ -критерия Стьюдента и критерия Фишера.

Обратимся теперь к учету особенностей каталогов КО. В каталогах РФ и США число объектов превышает 6000 [1]. Среди всех КО можно выделить группу активных КА, орбиты которых отображают текущие интересы человека в освоении космоса. Среди активных КА следует выделить группу маневрирующих объектов, как правило на основе дополнительной некоординатной информации и путем идентификации скачкообразных изменений траектории полета. Эту группу следует исключить из рассмотрения, поскольку неизвестны их законы активного управления движением.

Последовательный по времени ряд каталогов НУД КО позволяет получить временные ряды параметров движения, которые считаются независимыми для разных моментов времени. В то же время можно выделить группы объектов, имеющие близкие орбиты, например, околокруговые на низких высотах. Если известны их параметры на некоторый момент времени, то мы располагаем достаточ-



Автокорреляционная функция: dV1 — определенная по пятидесятисуточной выборке, составленной из данных 1995 г., для прогноза на сутки; dV2 — для прогноза на месяц

но большими выборками изохронных независимых измерений.

На практике в системе контроля космического пространства орбиты разных по важности КО уточняют в каталогах с разной периодичностью, заменяя их параметры движения в текущих каталогах прогнозируемыми значениями. Поэтому значения компонентов временного ряда претерпевают скачкообразные изменения корреляции соседних данных, которую необходимо учесть в обработке, что, естественно, ее усложняет и требует дополнительных исследований. Так, исследования автокорреляционной функции отклонений значений модуля вектора  $dV$ , представленной на рисунке и полученной для КА «Сич-1» на пятидесятисуточном интервале при прогнозе на сутки (dV1) и на месяц (dV2), показывают наличие существенной корреляции соседних значений. Оценки же, полученные для изохронных выборок сравнительно больших объемов, лишены этого недостатка.

Таким образом, исследования должны быть проведены для больших ансамблей траекторий КО. Большое количество КО в каталогах позволяет без особых вычислительных затрат получать оценки качества каталогов на основе изохронных выборок, которыми мы в данной работе ограничимся.

Учитывая существенное влияние на плотность атмосферы изменения солнечной активности, следует учесть временной фактор и получить оценки для нескольких уровней активности в пределах ее 11-летнего цикла: минимума, максимума и промежуточного значения.

Как отмечалось выше, для апробации предложенной методики были использованы данные Internet-каталогов НАСА в виде так называемых TLE-файлов (двухстрочных файлов). Эти каталоги обновляются не менее двух раз в сутки. Для прогноза по этим данным рекомендуется использовать свободно распространяемую программу TRAKSTAR.



НУД каталогов учитывают торможение КО и не содержат данных о текущей солнечной активности, к тому же TRAKSTAR их тоже не использует. На основании такого анализа структуры каталогов можно сделать вывод об учете в модели прогноза этой программы статической атмосферы, что и подтверждается ее описанием.

Следует отметить, что моделей точного прогноза солнечной активности на данный момент нет, поэтому для прогнозов на интервалы времени более суток, особенно в условиях высокой солнечной активности, предположительно могут иметь место чрезвычайно большие непрогнозируемые ошибки.

Вторичным результатом апробации методики стало получение оценок точности прогноза TRAKSTAR на более чем суточном интервале, в данном случае — двухнедельном. Величина интервала была выбрана исходя из практики проведения баллистико-навигационного обеспечения КА «Сич-1».

В обработку принимались КО на околоземных орбитах с эксцентриситетом  $e < 0.01$  и высотами в диапазонах: 200—500 км, 600—800 км, 1000—1200 км.

Такое объединение в генеральную совокупность разновысотных КО объясняется близостью высот и одинаковым временем прогноза, что обеспечивает близость погрешностей прогноза, а также тем, что на высотах до 800 км существенно влияние погрешности прогноза плотности атмосферы. На высотах порядка 1000—1500 км влиянии атмосферы незначительно.

Таким образом, полученные оценки имеют усредненный по высоте характер и позволяет различить особенности влияния атмосферы.

Выбор принятых диапазонов высот объясняется следующим. Высоты 200—500 км характеризуются относительно большой для полетов космических объектов плотностью атмосферы и являются в этом смысле определяющими для расчета времени их существования. На высотах свыше 1000 км проявляется влияние светового давления.

Высоты 600—800 км являются наиболее заселенными КО, очень привлекательны для солнечно-синхронных орбит, используемых КА дистанционного зондирования Земли, на которых специализируется Украина, и здесь влияние атмосферы не столь существенно как в первом диапазоне высот, но еще не проявляется влияние светового давления, данные для расчета которого также отсутствуют в НУД TLE-файлов.

Модель движения TRAKSTAR, согласно ее Internet-описанию состоящая из четырех частных моделей, учитывает до 8 гармоник разложения ГПЗ

по сферическим функциям.

Для апробации методики использовались модели движения, учитывающие в разложении ГПЗ от 4 до 16 зональных, секториальных и тессеральных гармоник, а также варианты моделей атмосферы: статическую (стандартная ГОСТ 4401-81 и CIRA-61) и динамическую (ГОСТ 25645-84) с использованием фактических суточных на дату начала прогноза среднегодовых и средних параметров солнечной активности  $F_{10.7}$  и геомагнитной напряженности  $A_p$ .

Средние параметры  $F_{10.7}^c$  и  $A_p^c$  специально подбирались для получения наиболее точного прогноза. Фактические суточные параметры  $F_{10.7}$  и  $A_p$  принимались постоянными на весь интервал прогноза.

В результате исследования были определены наборы моделей, имеющие наилучшие результаты для рассматриваемых диапазонов высот.

С целью их унификации для всего диапазона высот 200—1500 км была выбрана единая модель  $P_{4x0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$ , дающая наилучшие результаты прогнозирования для всех рассматриваемых диапазонов высот и уровней солнечной активности. Эта модель учитывает динамическую атмосферу с использованием средних параметров солнечной активности и четыре зональных гармоники разложения ГПЗ.

Оценка точности прогнозирования проводилась по следующим параметрам:

- периоду обращения ( $\Delta P$ ),
- эксцентриситету ( $\Delta e$ ),
- аргументу широты КО ( $\Delta U$ ),
- наклонению ( $\Delta i$ ),
- долготе восходящего узла ( $\Delta \Omega$ ).

Для сравнения проводился аналитический прогноз с использованием программы TRAKSTAR. Результаты оценок приведены в таблице.

Средняя ошибка прогнозирования орбит КО

Модель	$\Delta P$ , $10^{-1}$ с	$\Delta e$ , $10^{-4}$	$\Delta U$ , град	$\Delta i$ , $10^{-2}$ град	$\Delta \Omega$ , град
Диапазон высот 300 — 500 км					
$P_{4x0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$	2.90	6.18	4.06	8.0	0.042
TRAKSTAR	2.90	1.37	3.68	3.4	0.023
Диапазон высот 600 — 800 км					
$P_{4x0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$	9.00	2.59	0.42	3.1	0.022
TRAKSTAR	8.00	0.75	0.10	3.1	0.023
Диапазон высот 1000 — 1200 км					
$P_{4x0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$	0.18	1.57	0.51	0.21	0.0049
TRAKSTAR	0.04	0.86	0.05	0.21	0.0072

Таким образом фиксированный характер параметров солнечной активности подтверждают использование в TRAKSTAR статической модели атмосферы (разница только в ее параметрах).

Эти же обстоятельства и повышенный, по сравнению с TRAKSTAR, уровень ошибок прогноза  $P_{4x0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$  позволяют с высокой долей уверенности говорить о том, что данные TLE-файлов не являются первичными, а получены в результате их адаптации к модели движения этой программы. Чтобы достоверно подтвердить этот вывод, можно предложить следующее методическое решение: перекодировать в форматы TLE-файлов известные параметры орбит КА, полученные по первичным измерениям, и провести по ним оценку качества прогноза TRAKSTAR. Использование четырех зональных гармоник также не противоречит модели движения TRAKSTAR.

Таким образом, разработанная методика оценки качества (точности) каталогов НУД на примере данных Internet показала свою работоспособность, позволила определить модель движения, согласованную с известными параметрами движения, и получить оценки точности данных каталогов на основе TLE-файлов и сделать выводы о их характере.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку точности данных для интервалов прогноза большей длительности и других типов орбит.

1. Андреев О. В., Вениаминов С. С., Дикий В. И., Завалин В. Н. Каталог космических объектов российской системы контроля космического пространства // Космонавтика и ракетостроение. — 2000. — 18. — С. 40—49.
2. Бажинов И. К., Ястребов В. В. Навигация в совместном полете космических кораблей «Союз» и «Аполлон». — М.: Наука, 1978. — 224 с.
3. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978. — 348 с.
4. Хуторовский З. Н. Ведение каталога космических объектов // Космич. исследования. — 1993. — 4. — С. 101—114.

#### INVESTIGATION AND METHOD DEVELOPMENT OF QUALITY ESTIMATE OF CATALOGUES OF SPACE OBJECT MOTION PARAMETERS

M. V. Brovko, A. V. Golubek, I. A. Emelianova, P. G. Khorols'kyi

The article is devoted to statement of a task and quality estimate methods of development any catalogue of the space object motion parameters on example of the NASA research data distributed across the Internet without restriction.

УДК 621.396.946

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ ПРИ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ ЕЕ ПЕРЕДАЧИ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

© А. И. Бобров, С. И. Бобров

Державне підприємство «Укркосмос»

Розглянуто спосіб збільшення достовірності приймання інформації на основі використання складних сигналів при обмеженнях на потужність в еталонній смузі частот.

Достоверность (верность) [3] приема дискретной информации, то есть вероятность правильного приема переданного символа, тем больше, чем меньше вероятность ошибочного его отождествления с любым другим символом из другого ансамбля. Поскольку вероятность ошибки  $p_{\text{ош}}$  и вероятность правильного приема  $p_{\text{пр}}$  символа образуют полную группу событий, то

$$p_{\text{ош}} + p_{\text{пр}} = 1.$$

Отсюда следует, что достоверность  $D$  приема дискретной информации равна

$$D = p_{\text{пр}} = 1 - p_{\text{ош}}.$$

Для подавляющего числа методов модуляции и типов применяемых сигналов [1, 8]

$$p_{\text{ош}} = A[1 - \Phi(x)],$$

где  $A$  — коэффициент, определяемый методом модуляции ( $A < 1$ ):

$$\Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x e^{-0.5y^2} dy$$

— функция Крампа (интеграл вероятностей);  $x =$