

## СВОЙСТВА СОВОКУПНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

к.ф.-м.н. В.А. Ямницкий, О.Г. Симонова, к.т.н. В.Е. Саваневич

*В статье рассматривается методика и результаты исследования свойств совокупности радиолокационных измерений в модифицированной орбитальной системе координат. Выявленные свойства предлагается использовать при классификации совокупности радиолокационных измерений.*

**Постановка проблемы.** На начальном этапе полета (в течение первых 10 – 12 часов после запуска) группы вновь запущенных космических объектов (ВЗКО) по совокупности радиолокационных измерений необходимо сделать вывод о штатном или нештатном протекании запуска, а также о реализованной схеме выведения-разведения КА. Вероятность принятия правильного решения, оперативность достижения требуемой точности оценок параметров движения ВЗКО тем выше, чем точнее проведена классификация измерений.

Указанное решение должно быть принято при ограниченном количестве измерительной информации и практически в реальном масштабе времени под контролем оператора. В таких условиях принятие решения должно базироваться на применении достаточно устойчивого, точного и наглядного критерия. Целесообразно, чтобы такой критерий был устойчивым, скалярным и имел достаточно четкую физическую трактовку.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Задача классификации измерений в Центре контроля космического пространства Российской Федерации решается [1] в станционной системе координат (ССК) – сферической системе координат, центр которой находится в точке привязки антенного полотна РЛС. Этому соответствует разветвленная сеть радиолокационных станций (РЛС) Российской Федерации [2].

Невязки в ССК вычисляются просто, но они зависят от параметров средства наблюдения и расположения КА по отношению к нему, следовательно, не являются устойчивыми [3]. В Системе контроля и анализа космической обстановки (СКАКО) Украины такой вариант решения задачи затруднителен из-за ограниченного количества измерительной информации. Поэтому в СКАКО в ряде случаев при классификации измерений в ССК использовалась взвешенная невязка по времени  $\Delta t$ , вычис-

ляемая по двум компонентам – дальности  $d$  и азимуту  $\varepsilon$  [4]. Однако, и эта невязка является станционно-зависимой, а ее количественная мера зависит от расположения КА по отношению к наблюдателю.

Вероятность ошибок классификации измерений ниже в той системе координат (СК), в которой выше различимость гипотез о принадлежности измерений. Трудоемкость пересчета измерений из ССК в любую другую СК при быстройдействии современной вычислительной техники не может значительно повлиять на оперативность принимаемых решений. Гораздо важнее насколько устойчива к изменениям координат КО выбранная СК при небольших изменениях элементов орбиты КО.

В качестве критерия естественно использовать невязки между измерениями и априорной орбитой в некоей системе координат. Невязки считаются устойчивыми, если небольшие изменения параметров априорной орбиты приводят к небольшим изменениям значений самих невязок.

В работе [5] была предложена модифицированная орбитальная система координат (МОСК) и в дальнейшем в [4] в качестве критерия выделена невязка по времени привязки измерения. Целью статьи является анализ свойств параметров измерений в МОСК и доказательство соответствия МОСК требованиям по наглядности и оперативности.

**Постановка задачи.** В качестве измерительной информации используются радиолокационные измерения – оценка параметров траектории КО и их ошибок в ССК по трем координатам ( $d$  – дальность,  $\varepsilon$  – азимут,  $\gamma$  – угол места), трем скоростям ( $\dot{d}$  – радиальная скорость,  $\dot{\varepsilon}d$  – линейная азимутальная скорость,  $\gamma\dot{d}$  – линейная угломестная скорость) на время привязки измерения  $t_3$ .

Измерения содержат ошибки с нулевыми средними и заданной диагональной корреляционной матрицей [2]. При прогнозировании параметров опорной орбиты используется модель возмущенного движения КО как материальной точки постоянной массы без учета движения вокруг центра масс и с учетом таких возмущающих воздействий [6] как нецентральность гравитационного поля Земли ( $4 \times 4$  гармоника) и ускорений, вызванных взаимодействием с верхней атмосферой Земли. Такая модель движения описывается системой шести дифференциальных уравнений первого порядка в абсолютной неподвижной системе координат. Расчет параметров измерений в МОСК осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в [4].

Необходимо разработать методику исследования свойств совокупности измерений в МОСК и с ее использованием выявить их свойства.

**Устойчивость и наглядность различных СК.** Станционная систе-

ма координат является неустойчивой СК, т.к. небольшие изменения элементов орбиты КО приводят к значительным изменениям его координат в ССК. Этот недостаток ССК приобретает особое значение при обнаружении группы близких объектов. Кроме того, не все параметры в ССК имеют высокую точность определения [2]: наиболее точно определяются только дальность, ошибки азимута и особенно угла места, как правило, существенные; аналогичный вывод можно сделать о скоростных составляющих. Кроме того, многомерность невязок в ССК не позволяет обеспечить необходимую наглядность процесса классификации измерений от группы ВЗКО.

Можно было бы производить классификацию измерений в оскулирующих элементах орбиты (ЭО), однако этому препятствуют большие ошибки оценок оскулирующих ЭО, полученных путем пересчета параметров одного измерения в указанные ЭО. Наиболее точно в оскулирующих ЭО определяются только наклонение орбиты  $i$  и долгота восходящего узла  $\Omega$ . Многомерность невязок в оскулирующих ЭО не способствует наглядности процесса классификации измерений от группы ВЗКО.

Предполагается, что МОСК [5] является устойчивой системой, а наглядность ее при принятии решения обеспечивается при использовании одного параметра – невязки по времени привязки измерения, имеющего достаточно четкую физическую трактовку.

**Методика исследования свойств совокупности радиолокационных измерений в МОСК.** Для определения свойств измерений в МОСК была разработана методика и в соответствии с ней проведен модельный эксперимент. При этом моделировались измерения, вводились заведомо известные отклонения каждого отдельно взятого параметра опорной орбиты и анализировались зависимости изменения координат КО в МОСК. В качестве опорной орбиты была выбрана орбита КА "UOSAT-12". Такой выбор связан с тем, что запуски КО, производимые ракетой-носителем "Днепр", осуществляются на средневысокие орбиты.

Исследование свойств серий измерений от одного КО в МОСК включает два этапа: подготовительный, на котором осуществляется моделирование измерений, и основной – этап непосредственного исследования координат КО в МОСК. Моделирование измерений производится на временном интервале  $t_N$  в соответствии со следующей методикой.

1. Определяются состав и параметры наблюдательных средств (НС).
2. В соответствии с параметрами опорной орбиты рассчитывается план прохождения КО через зоны обзора каждого НС.
3. По данным плана прохождений для каждого НС определяются предполагаемые моменты времени привязки измерения как середины

временных интервалов пребывания КА в зоне обзора НС, скорректированные на случайную величину.

4. Параметры орбиты КО прогнозируются на предполагаемые моменты времени привязки измерения в зоне каждого НС. Экстраполированные параметры орбиты пересчитываются в параметры измерения и в каждый параметр измерения вносятся соответствующие ошибки.

В соответствии с данной методикой промоделированы измерения при гипотетическом прохождении КА "UOSAT-12" через зоны обзора НС на 6-дневном интервале и в результате сформировано 28 измерений.

**Целью основного этапа исследований** является: во-первых, выявление закономерностей и геометрических свойств параметров измерения  $Y, Z, \alpha, \beta, \Delta V, \Delta t$  в МОСК при изменении параметров опорной орбиты; во-вторых, определение границ устойчивости координат измерений в МОСК при изменении параметров опорной орбиты.

Верхней границей устойчивости некоторого параметра орбиты КО является значение, начиная с которого его дальнейшее изменение приведет к значительным изменениям координат КО в МОСК.

Методика исследования закономерностей параметров движения в МОСК включает следующие операции.

1. Принудительно изменяются элементы опорной орбиты.

Параметры орбиты задаются в оскулирующих элементах, поэтому изменению (как увеличению, так и уменьшению значений) подлежат параметры:  $t_3$  – время прохождения экватора,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $i$  – наклонение плоскости орбиты,  $T$  – период обращения КО,  $e$  – эксцентриситет,  $\omega$  – аргумент перигея. При этом исследуются геометрические свойства координат КО в МОСК при изменении одного из параметров орбиты, а затем одновременно нескольких параметров орбиты.

2. Определяются координаты КО в МОСК.

3. Производится графическое отображение параметров измерений в МОСК.

4. Осуществляется накопление статистических данных.

**Свойства координат измерений в МОСК.** Анализ накопленного в результате эксперимента статистического материала показал, что:

1. При изменении времени прохождения экватора в пределах границ устойчивости  $|\Delta t_3| \leq 10$  мин селективным признаком в МОСК является невязка по времени привязки измерения  $\Delta t$  ( $\Delta t$  во времени  $t_N$  практически постоянна). При этом траектория  $\Delta t$  может быть описана полиномом нулевой степени. Если  $\Delta t > 0$ , то реальное время прохождения последнего экватора меньше на величину  $\Delta t$  ( $t_3 = t_3 - \Delta t$ ), и наоборот, при  $\Delta t < 0$

реальное  $t_3 = t_3 + \Delta t$ . На рис. 1 и 2 изображены траектории параметра  $\Delta t$  при  $t_3 = t_3 \pm 5$  мин. Изменения координат  $Y, Z, \alpha, \beta, \Delta V$  не превышают допустимые ошибки измерений по соответствующим координатам.

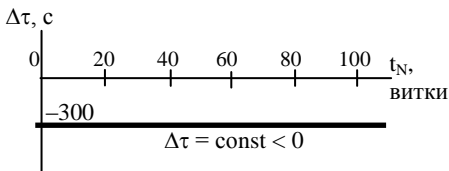


Рис. 1. Траектория невязки в МОСК при увеличении времени прохождения экватора

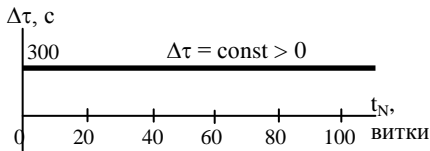


Рис. 2. Траектория невязки в МОСК при уменьшении времени прохождения экватора

2. Верхней границей устойчивости при изменении периода обращения КО является величина  $|\Delta T| \leq 3$  мин. При изменении  $0,7 < |\Delta T| \leq 3$  мин селективными признаками являются координаты  $Y, Z, \Delta t$ . При этом траектория  $Y$  может быть описана полиномом нулевой степени;  $Z$  может быть описана полиномом первой степени;  $\Delta t$  может быть описана полиномом первой степени. Изменения  $\alpha, \beta, \Delta V$  не превышают допустимые ошибки измерений по соответствующим координатам. На рис. 3, а, б, в и 4, а, б, в изображены траектории параметров  $Y, Z, \Delta t$  при изменении периода обращения КО на 3 мин.

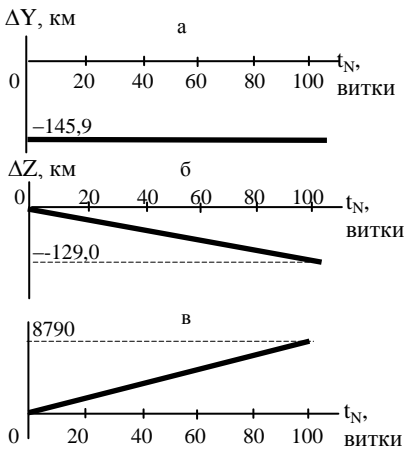


Рис. 3. Траектории невязок в МОСК при уменьшении периода обращения КА

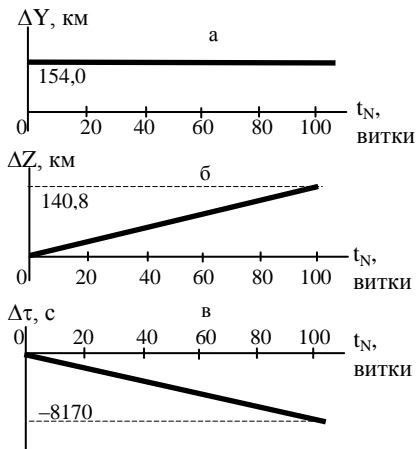


Рис. 4. Траектории невязок в МОСК при увеличении периода обращения КА

3. Верхней границей устойчивости при изменении долготы восходящего узла является величина  $|\Delta \Omega| \leq 5^\circ$ . При изменении  $0,7^\circ < |\Delta \Omega| \leq 5^\circ$

селективными признаками являются координаты  $Z$ ,  $\Delta\tau$ . При этом траектория  $Z$  может быть описана полиномом нулевой степени; траектория  $\Delta\tau$  может быть описана полиномом нулевой степени. Изменения координат  $Y$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Delta V$  не превышают допустимые ошибки измерений по соответствующим координатам. На рис. 5, а, б и 6, а, б изображены траектории параметров  $Z$ ,  $\Delta\tau$  при изменении долготы восходящего узла на  $5^\circ$ .

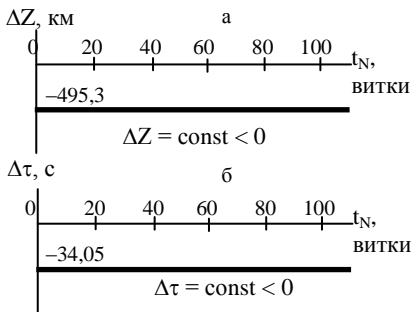


Рис. 5. Траектории невязок в МОСК при уменьшении долготы восходящего узла

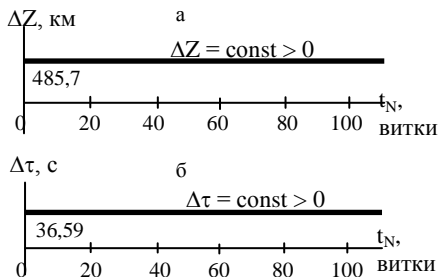


Рис. 6. Траектории невязок в МОСК при увеличении долготы восходящего узла

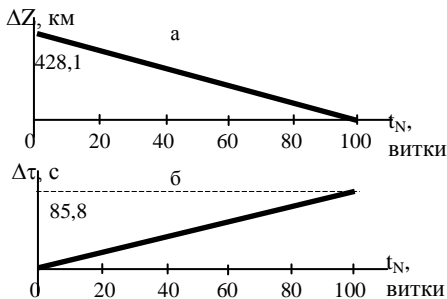


Рис. 7. Траектории невязок в МОСК при уменьшении наклона плоскости орбиты

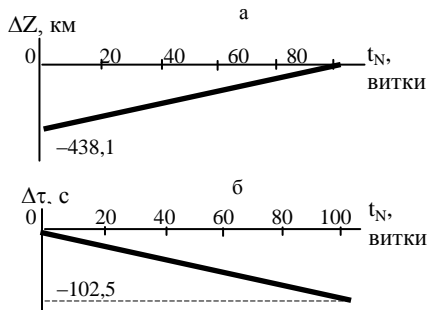


Рис. 8. Траектории невязок в МОСК при увеличении наклона плоскости орбиты

4. Верхней границей устойчивости при изменении наклона плоскости орбиты является величина  $|\Delta i| \leq 5^\circ$ . При изменении  $0.4^\circ < |\Delta i| \leq 5^\circ$  селективными признаками являются координаты  $Z$ ,  $\Delta\tau$ . При этом траектория  $Z$  может быть описана полиномом первой степени; траектория  $\Delta\tau$  может быть описана полиномом первой степени. Изменения  $Y$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Delta V$  не превышают допустимые ошибки измерений по соответствующим координатам. На рис. 7, а, б и 8, а, б изображены траектории невязок  $Z$ ,  $\Delta\tau$  при изменении наклона плоскости орбиты на  $5^\circ$ .

5. Одновременное изменение нескольких параметров орбиты приводит к изменению трех координат в МОСК:  $Y$ ,  $Z$  и  $\Delta\tau$ . Так, при изменении параметров орбиты  $i$  и  $T$  изменение координаты  $Y$  может быть описано полиномом нулевой степени,  $Z$  – полиномом первой степени;  $\Delta\tau$  – полиномом первой степени. Изменения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Delta V$  не превышают допустимые ошибки по соответствующим координатам. На рис. 9, а, б, в и 10, а, б, в представлены варианты траекторий невязок  $Y$ ,  $Z$ ,  $\Delta\tau$  при изменении наклона плоскости орбиты на  $1^\circ$  и периода обращения на 1 мин. Результаты проведенного анализа подтверждены натурными экспериментами по контролю выведения на орбиту групп малоразмерных КО: для трех КО (запуск 1999 г.), для семи КО (запуск 2000 г.) и восьми КО (запуск 2002 г.).

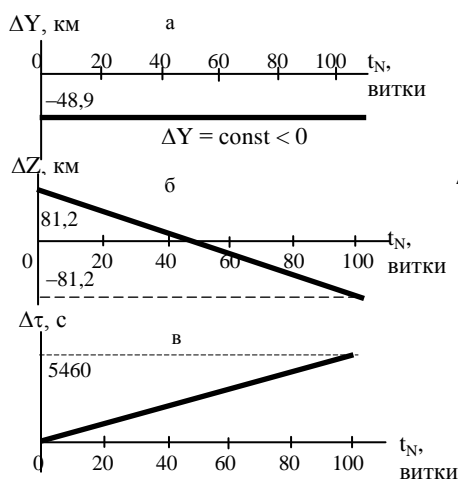


Рис. 9. Траектории невязок в МОСК при одновременном уменьшении наклона плоскости орбиты и периода обращения

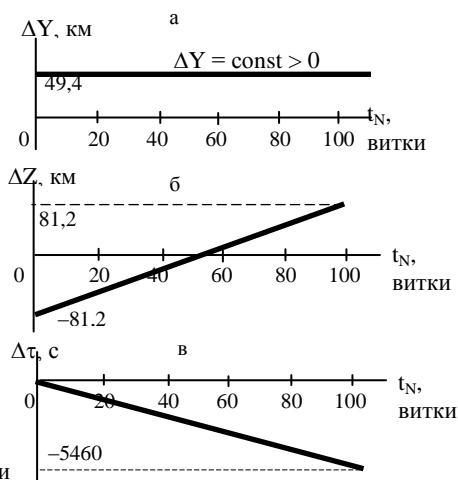


Рис. 10. Траектории невязок в МОСК при одновременном увеличении наклона плоскости орбиты и периода обращения

**Выводы.** Проведенный анализ показал, что введенная модифицированная орбитальная система координат удовлетворяет требованиям устойчивости и наглядности. Особое место в МОСК занимает невязка по времени привязки измерения  $\Delta\tau$ , которая является комплексной невязкой всех компонентов прогноза и измерения. Изменение какого-либо параметра орбиты КО приводит к изменению именно невязки по времени привязки измерения.

Координаты КО в МОСК имеют ряд свойств, которые можно использовать для улучшения показателей качества классификации измерений. Так,

например, невязка по времени привязки измерения содержит в себе практически всю информацию о внутригрупповых отличиях измерений, принадлежащих группе близких КО. Остальные параметры измерений в МОСК характеризуют межгрупповые отличия.

В МОСК невязка по времени привязки измерения имеет линейную траекторию и может быть описана полиномом нулевой или первой степени в зависимости от того, какие параметры реальной орбиты КО отличаются от параметров используемой опорной орбиты.

Геометрические свойства невязки по времени привязки измерения могут быть использованы в апостериорных байесовских классификаторах координатной информации. Разработка последних может быть выбрана в качестве приоритетного направления дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саврасов Ю.С. Методы определения орбит космических объектов. – М.: Машиностроение, 1981. – 174 с.
2. Хуторовский З.Н. Ведение каталога космических объектов // Космические исследования. – 1993. – Вып. 4, Т. 31. – С. 101 – 114.
3. Назаренко А.И., Скребушевский Б.С. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 260 с.
4. Зюбин В.И., Ямницкий В.А., Борцов В.В., Симонова О.Г. Принятие решения о штатном или нештатном протекании управляемого спуска с орбиты в условиях недостаточности информации // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вып. 4(14). – С. 126 – 132.
5. Зюбин В.И., Лазебник С.В., Симонова О.Г. Распознавание фрагментов запуска космического аппарата на основе баллистической информации // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вып. 2(8). – С. 191 – 193.
6. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике // Под ред. Г.Н. Дубошина. – М.: Наука, 1976. – 864 с.

Поступила 12.04.2004

**ЯМНИЦКИЙ Валерий Аронич**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., ведущий научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1958 году окончил Харьковский политехнический институт. Области научных интересов – космическая баллистика, управление средствами космического пространства, программные тренажеры для пилотируемой космонавтики.

**СИМОНОВА Ольга Геннадиевна**, старший научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1978 году окончила ХИИТ. Область научных интересов – обработка локационной информации.

**САВАНЕВИЧ Вадим Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент, докторант ХВУ. В 1986 году окончил Харьковское ВУРЭ. Область научных интересов – обработка локационной информации, информметрия.



