

А.А. Ткаченко¹, В.А. Кочура², Ю.В. Резников¹, В.В. Куценко¹

¹ Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

² Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЭТАПНОГО АЛГОРИТМА ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОДНОМ МЕРНОМ ВИТКЕ

Проведен анализ эффективности многоэтапного алгоритма первоначального определения орбиты космического объекта при обработке результатов измерений нескольких радиолокационных станций на одном витке. По результатам статистического моделирования показаны условия, при которых обеспечивается высокая вероятность взятия на сопровождение низкоорбитального космического объекта на одном мерном витке.

Ключевые слова: космический объект, первоначальное определение орбиты, статистическое моделирование.

Введение

Постановка проблемы. Эффективность и безопасность космической деятельности в условиях постоянного роста заселенности околоземных орбит во многом зависит от эффективности решения информационно-аналитических задач контроля космического пространства (ККП), в частности, оперативности взятия на сопровождение новых космических объектов (КО). В Украине решение этих задач возлагается на Национальную Систему контроля и анализа космической обстановки (СКАКО). После денонсации Россией соглашения про средства систем предупреждения о ракетном нападении и ККП актуальной задачей является обеспечение эффективного использования радиолокационных станций надгоризонтного обнаружения (РЛС) при обнаружении и взятии на сопровождение новых КО. Планом мероприятий по развитию СКАКО предусмотрено совершенствование программно-алгоритмического обеспечения в части первоначального определения параметров траекторий (орбит) КО, а также модернизация аппаратуры РЛС, которая даст возможность существенно улучшить точность измерения координат и снять ограничения на время сопровождения цели средствами РЛС.

Анализ потенциально достижимой оперативности взятия на сопровождение КО (времени достижения такого уровня точности оценки параметров орбиты нового КО, который требуется для принятия решения о внесении этого объекта в каталог сопровождаемых объектов) показал, что при существующем размещении, пространственной ориентации и характеристиках зон обнаружения национальных РЛС взятие на сопровождение нового КО по измерительной информации, полученной на одном витке, может быть достигнуто при выполнении ряда требований по точности и условиям проведения измерений: на одном витке полета КО должен проходить через зоны обнаружения нескольких РЛС; каж-

дая РЛС проводит измерения на всем интервале прохождения объекта через зону обзора станции; значения средних квадратических отклонений (СКО) погрешностей измерения угла места β и радиальной скорости \dot{D} должны удовлетворять условиям:

$$\sigma_{\beta} \leq \approx 0,2^{\circ}, \quad \sigma_{\dot{D}} \leq \approx 10 \text{ м/с},$$

соответственно [1]. Однако методы и алгоритмы, позволяющие решить задачу взятия на сопровождение КО с оперативностью, близкой к потенциально достижимой, не были рассмотрены.

В работе [2] предложено при первоначальной оценке параметров движения КО по результатам измерений РЛС использовать многоэтапный алгоритм определения орбиты на основе классических методов небесной механики, базирующихся на законах Кеплера. Показана высокая эффективность использования алгоритма при оценке параметров орбиты КО на одном сеансе наблюдения. Этот алгоритм может быть использован и при совместной обработке сеансов измерений нескольких РЛС, проведенных на одном витке полета КО.

Цель работы – анализ эффективности многоэтапного алгоритма первоначального определения орбиты КО при обработке результатов нескольких сеансов измерений РЛС на одном мерном витке с учетом флуктуационных и систематических погрешностей измерений.

Результаты исследований

Показатель эффективности алгоритма. Условием взятия на сопровождение нового (ранее не сопровождавшегося) КО является достижение такой точности оценки параметров его орбиты \dot{X} , которая обеспечит погрешность прогнозирования движения объекта не больше заданной. По оценке [3] предельно допустимая погрешность прогноза (в пересчете на время) для низких (наиболее заселенных) орбит составляет

$$\Delta t_{\max} \cong 1 \text{ мин.} \quad (1)$$

Учитывая, что наибольший вклад в неопределенность прогнозного местоположения КО вносит погрешность оценки периода, накапливаемая с течением времени, условие контролируемости может быть задано в виде некоторого допустимого диапазона погрешности оценки периода \hat{T} :

$$|\Delta T| \leq \Delta T_{\max}, \quad (2)$$

где $\Delta T = \hat{T} - \tilde{T}$ – погрешность оценки периода; \tilde{T} – истинное значение периода; ΔT_{\max} – предельно допустимое значение ΔT .

При задании ΔT_{\max} необходимо учитывать длительные интервалы ненаблюдаемого движения низкоорбитальных КО, которые в СКАКО достигают 6...11 витков полета. Например, для взятия на сопровождение КО с орбитой, близкой к орбите национального космического аппарата (КА) «Сич-1», для которого перерывы между последовательными сеансами наблюдения в СКАКО составляют до 6 витков, абсолютная погрешность оценки периода не должна превышать

$$\Delta T_{\max} \cong 10 \text{ с.}$$

В силу случайного характера погрешностей измерений оценка \hat{T} также является случайной величиной, поэтому в качестве показателя эффективности оценивания выбрана вероятность попадания оценки \hat{T} в заданный интервал (2) с учетом смещения и характеристик рассеяния. Полагая, что оценка \hat{T} является нормальной случайной величиной, вероятность ее попадания в интервал (2) может быть записана как [4]:

$$P_T = \Phi\left(\frac{\Delta T_{\max} - \delta_T}{\sigma_T}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta T_{\max} + \delta_T}{\sigma_T}\right), \quad (3)$$

где Φ – функция Лапласа; δ_T – смещение оценки \hat{T} ; σ_T – СКО оценки \hat{T} .

Методика оценки показателя эффективности.

Оценка вероятности P_T производилась по результатам моделирования процесса обработки результатов радиолокационных измерений. Движение КО описывалось моделью возмущенного движения, которая используется в Центре ККП СКАКО при оценке параметров орбит КО [5]. Вектор измеряемых параметров РЛС включает дальность D , азимут α , β и \dot{D} :

$$\mathbf{Y} = (D, \alpha, \beta, \dot{D}).$$

При моделировании результатов измерений учитывались как флуктуационные, так и систематические погрешности измерений

$$\mathbf{Y}(t_i) = \tilde{\mathbf{Y}}(\mathbf{X}, t_i) + \xi(t_i) + \delta, \quad (4)$$

где $\mathbf{Y}(t_i)$ – вектор моделированных значений результатов измерений на момент t_i ; $\tilde{\mathbf{Y}}(\mathbf{X}, t_i)$ – вектор расчетных значений измеряемых параметров для КО с параметрами орбиты \mathbf{X} на момент t_i ;

$\xi(t_i) = \left| \xi_{D_i}, \xi_{\alpha_i}, \xi_{\beta_i}, \xi_{\dot{D}_i} \right|$ – вектор флуктуационных

погрешностей измерений на момент t_i , представляющих собой нормальные центрированные случайные величины с СКО $\sigma_D, \sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_{\dot{D}}$, соответственно; $\delta = \left| \delta_D, \delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_{\dot{D}} \right|$ – постоянный вектор систематических погрешностей измерений.

Оценка вероятности P_T для рассматриваемого алгоритма выполнялась в следующем порядке:

для заданного КО с параметрами орбиты \mathbf{X} на интервале 7 суток рассчитывался план прохождения через зоны обзора РЛС СКАКО;

на каждом сеансе наблюдения в пределах одного мерного витка после входа в зону обнаружения каждой РЛС моделировались измерения с темпом 3 сек с учетом флуктуационных и систематических погрешностей измерений по (4);

по полученной выборке моделированных результатов измерений проводился расчет оценок параметров движения КО $\hat{\mathbf{X}}$ по многоэтапному алгоритму;

на каждом (i -м) мерном витке проводилось $M = 950$ имитационных экспериментов (количество экспериментов определялось исходя из условия обеспечения значения доверительной вероятности $\rho = 0,9$ и максимальной вероятной погрешности $\varepsilon = 0,1$ [4]) и рассчитывалась оценка периода

$$\hat{T}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \hat{T}_{ij},$$

ее смещение $\hat{\delta}_{T_i}$ относительно \tilde{T} и СКО $\hat{\sigma}_{T_i}$:

$$\hat{\delta}_{T_i} = \hat{T}_i - \tilde{T}, \quad \hat{\sigma}_{T_i} = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (\hat{T}_{ij} - \hat{T}_i)^2;$$

для каждого (i -го) мерного витка рассчитывалась оценка \hat{P}_{T_i} по (3) при $\Delta T_{\max} = 10$ с.

При выполнении моделирования использовались следующие значения СКО случайных погрешностей измерений:

$$\sigma_D = 1500 \text{ м}, \quad \sigma_\alpha = 0,2^\circ, \quad \sigma_\beta = 0,2^\circ, \quad \sigma_{\dot{D}} = 10 \text{ м/с}.$$

Величина систематической составляющей погрешности измерений по каждому измеряемому параметру соответствовала величине СКО случайной составляющей

$$\delta_k = \sigma_k, \quad k = (D, \alpha, \beta, \dot{D}).$$

Были проведены расчеты применительно к КА «Сич-1». Параметры зон обнаружения РЛС, которые использовались при моделировании, соответствовали параметрам, используемым в СКАКО при сопровождении КО [6]. Анализ плана прохождения КО через зоны обзора РЛС показал, что практически на половине мерных витков обеспечивается суммарное время наблюдения КО (одной или несколькими РЛС) t_n , превышающее 220 сек и только на 13 % мерных витках КО наблюдается менее, чем 150 сек. Гистограмма распределения мерных витков по величине t_n показана на рис. 1. Средние значения вероятности P_T для мерных витков в разных диапазонах t_n показаны на рис. 2.

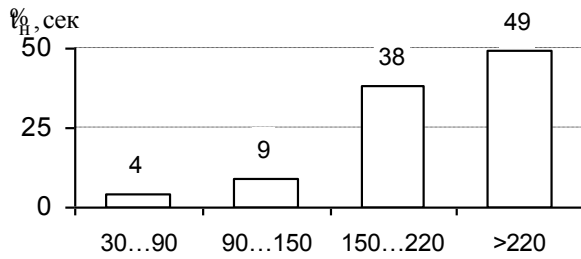


Рис. 1. Распределение мерных витков по общему времени наблюдения КО (одной или несколькими РЛС)

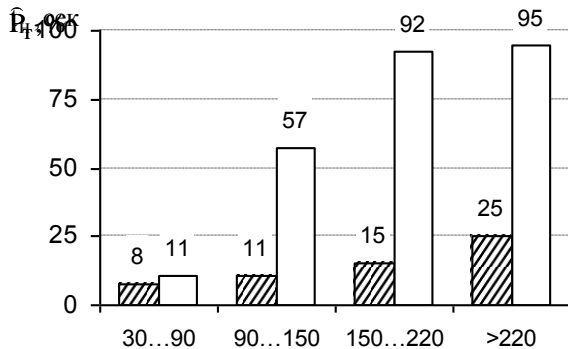


Рис. 2. Оценка вероятности выполнения условия (2) на одном мерном витке
□ – $\delta = 0$, ▨ – $\delta \neq 0$

При отсутствии систематических погрешностей измерений рассматриваемый алгоритм обеспечивает более чем 90 % вероятность выполнения условия (2) в 87 % случаев (при $t_n > 150$ сек).

Еще в 9 % случаев (при $t_n = 90...150$ сек) алгоритм обеспечивает выполнения условия (2) с вероятностью более 50 %.

Наличие систематической составляющей в погрешностях измерений равной величине СКО случайной составляющей резко уменьшает \bar{P}_T . Так для относительно длительных интервалов наблюдения КО значение \bar{P}_T не превышает 25 %.

Выводы

Таким образом, показано, что при условии снятия ограничений на время сопровождения КО средствами РЛС и повышении точности измерений при модернизации РЛС, многоэтапный алгоритм первоначального определения параметров орбиты КО, предложенный в [2], позволяет обеспечить более чем 90 % вероятность выполнения необходимых условий для взятия на сопровождение низкоорбитального КО на одном мерном витке при общем времени наблюдения более 150 сек, т.е. в 87 % случаев.

Список литературы

1. Ткаченко А.А. Повышение оперативности взятия на сопровождение низкоорбитального космического объекта в Национальной системе контроля и анализа космической обстановки / А.А. Ткаченко, В.А. Кочура, Д.Б. Жушков, А.В. Поляков // Системы управления, навигации та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2010. – Вип. 3 (15). – С. 51-53.
2. Деденок В.П. Метод определения параметров движения баллистических объектов по измерениям радиолокационных средств государственной системы контроля и анализа космической обстановки / В.П. Деденок, А.А. Ткаченко // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 1 (48). – С. 37-40.
3. Хуторовский З.Н. Контроль космических объектов на низких орбитах / З.Н. Хуторовский, В.Ф. Бойков, Л.Н. Пылаев // Околосемная астрономия: Сборник научных трудов. – М.: ИА РАН, 1998. – С. 34-101.
4. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р.М. Юсупова. – М.: МО СССР, 1984. – 563 с.
5. Эскизный проект "Создание Системы контроля и анализа космической обстановки 1-ой очереди". Часть 2. Центр контроля космического пространства "Спостереження" ПЗ 2. – Дн-ск: ГKB "Южное", 1997. – 207 с.
6. Эскизный проект "Создание Системы контроля и анализа космической обстановки 1-ой очереди". Часть 6. Источники и потребители информации системы контроля и анализа космической обстановки "Спостереження" ПЗ 6. – Дн-ск: ГKB "Южное", 1997. – 151 с.

Поступила в редколлегию 10.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. Г.В. Худов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОЕТАПНОГО АЛГОРИТМУ ПЕРВИННОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ НИЗЬКООРБИТАЛЬНОГО КОСМІЧНОГО ОБ'ЄКТА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ НА ОДНОМУ МІРНОМУ ВИТКУ

А.О. Ткаченко, В.О. Кочура, Ю.В. Резніков, В.В. Куценко

Проведений аналіз ефективності багатоетапного алгоритму первинного визначення орбіти космічного об'єкта при обробці результатів вимірювань декількох радіолокаційних станцій на одному витку. За результатами статистичного моделювання показані умови, за яких забезпечується висока ймовірність взяття на супроводження низькоорбітального космічного об'єкта на одному мірному витку.

Ключові слова: космічний об'єкт, первинне визначення орбіти, статистичне моделювання.

THE ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF THE INITIAL ORBIT DETERMINATION MULTISTAGE ALGORITHM AT THE PROCESSING OF RADAR MEASUREMENTS, WHICH ARE TAKEN WITHIN ONE CIRCLE OF A LOW ORBIT SPACE VEHICLE

A.A. Tkachenko, V.A. Kochura, U.V. Reznikov, V.V. Kutsenko

The analysis of the efficiency of the initial orbit determination multistage algorithm at processing of some radars' measurements, which are taken within one circle, is conducted. According to the results of statistical modeling, the conditions, which ensure an achievement of a high probability of taking a low orbit space vehicle on tracking within one measuring circle, are shown.

Keywords: space vehicle, initial orbit determination, statistical modeling.

