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, 512 с., 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.

Введение

При контроле состояния околоземного космического пространства с использованием обзорных оптико-электронных средств при получении совокупности угловых измерений в местной инерциальной системе координат эпохи J2000, в пункте обработки одной из решаемых задач является задача их идентификации с известными векторами состояния орбитальных параметров каталогизированных КО с возможным отказом от принятия положительного решения.

В обработку поступают сгруппированные в проводки измерения, которые в общем случае могут быть связаны с разными наблюдаемыми КО. Для решения задачи идентификации используются алгоритмы, синтезированные на базе байесовского подхода [1] или информационного критерия [2].

Особенности реализации алгоритма идентификации обусловлены тем обстоятельством, что вектор состояния КО является функцией времени, и он должен быть определен с использованием дифференциальных уравнений движения на время получения углового измерения и приведения вектора состояния в единую систему координат. Эти вопросы в достаточно полном объеме нашли отражение в литературе. В частности, в качестве таких работ следует упомянуть источники [3, 4, 5].

В настоящей работе, базируясь на известных результатах преобразования вектора состояния и структуры синтезированного в [6] адаптивного байесова алгоритма принятия решения, конкретизируется алгоритм идентификации угловых измерений с известными векторами состояний КО.

Постановка задачи и синтез алгоритма идентификации.

В самом общем виде задача идентификации углового измерения совокупности векторов состояния сводится к задаче проверки совокупности гипотез и может быть поставлена следующим образом.

Пусть получен двумерный вектор углового измерения X_0 в составе двух углов измерения α, δ – (склонение и прямое восхождение в местной системе отсчета J2000 на момент времени t_0) и связанная с ним оценка корреляционной матрицы W_{x_0} . В двумерном пространстве измерений Ω_X введем положительно определённую функцию измерений $l(x|X_0, W_{x_0}) = N(X_0, W_{x_0})$.

Пусть имеется M s -мерных векторов состояний $G_s(\beta) = \{\beta_i(i), t_i, i \in [1, M]\}$, значение которых определено на момент времени $t_i \leq t_0$ и соответствующие им оценки корреляционной матрицы $W_{\beta_{t_i}}$.

Требуется принять решение с каким из объектов $\beta_i(i)$ связано (идентифицировано) измерение X_0 .

Поскольку справедливо условие $s \geq 2$ и известен механизм преобразования вектора состояния во времени (дифференциальные уравнения движения) [5], то после проведения прогнозирования статистики $G_s(\beta)$ на момент времени t_0 и проектирования её в двумерное пространство Ω_X соответствующую статистику $G_s(\beta|t_0)$ удаётся представить в виде совокупности функций измерения $G_2(X|t_0) = \{l(x|X_i, W_{x_i}), t_0, i \in [1, M]\}$.

В соответствии с адаптивным байесовым подходом при использовании аддитивной функции потерь решение задачи сводится к независимой проверке совокупности M двувальтернативных гипотез путём сравнения с порогом соответствующей апостериорной вероятности $p_a(i|l(x|X_0, W_{x_0}))$ [6] принадлежности X_0 i КО из каталога в пространстве угловых измерений Ω_X по следующему правилу

$$d(i|l(x|X_0, W_{x_0})) = \begin{cases} 1 & \text{при } p_a(i|l(x|X_0, W_{x_0})) \geq c_i \\ 0 & \text{в противном случае; } i = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Здесь $d(i|l(x|X_0, W_{x_0}))$ – нерандомизированное решающее правило (индикаторная функция), принимающее значение 1 в области, где приведенное неравенство справедливо;

$p_a(i|l(x|X_0, W_{X_0})) = l(\hat{X}_i|X_0, W_{X_0}) / (\sum_{j=1}^M l(\hat{X}_j|X_0, W_{X_0})) \approx 1$; c_i – порог для принятия положительного решения по i -й гипотезе.

Обоснуем справедливость приведённого выражения для апостериорной вероятности $p_a(i|l(x|X_0, W_{X_0}))$. Мы рассматриваем с одной стороны совокупность каталогизированных КО, для которых оценка вектора состояний β_i получена с высокой точностью по совокупности большого количества измерений от различных средств наблюдения и дополнительной априорной информации, а с другой стороны – единичный вектор углового измерения X_0 . Поэтому с высокой вероятностью справедливо неравенство $\det W_{X_i} \ll \det W_{X_0}$ и условие разрешимости областей локализации проекций векторов состояний каталогизированных КО в Ω_X : $\Omega_{X_i} \cap \Omega_{X_j} \cong \emptyset$ при $i \neq j$. С учетом вышесказанного и теоремы о среднем для совместной плотности поступившего измерения X_0 и проекции вектора состояния X_i в Ω_X имеем

$$p(x, X_0, X_i) = \int_{\Omega_X} l(x|X_0, W_{X_0}) l(x|X_i, W_{X_i}) dx = l(\hat{X}_i|X_0, W_{X_0}) \theta_i(x) \text{ при } x \in \Omega_{X_i} \text{ и } \hat{X}_i \in \Omega_{X_i}$$

где $\theta_i(x)$ – носитель значимых значений в области Ω_{X_i} (например, на уровне 3σ).

В силу сказанного возникает ситуация, когда можно принять неоднозначное решение о принадлежности поступившего измерения к нескольким каталогизированным КО, и возникает проблема достоверного принятия решения об его идентификации. Для её решения нами предлагается использовать аппарат формирования интервальных оценок [7] и ввести характеристику идентификации анализируемого вектора угловых измерений, и автоматизированный алгоритм его идентификации.

Под характеристикой идентификации будем понимать количество каталогизированных КО, попавших в заданную область изменения параметров вектора угловых измерений при выбранном уровне доверия $n(\alpha)$: $\alpha \in [\alpha_0, 1)$. С практической точки зрения наиболее важным на начальном уровне анализа является не пропустить правильную идентификацию вектора измерения, поэтому в работе предлагается существенно расширить традиционный подход к оценке доверительного интервала, когда уровень доверия $\alpha \geq 0.9$. Установим допустимый минимальный уровень доверия (вероятность того, что доверительный интервал покрывает значение параметра) $\alpha_0 \cong 0.5$ и уровень для принятия решения в автоматическом режиме $\alpha_a \geq 0.9$. В рамках принятой модели описания доступной статистики (нормальной модели поступившего вектора угловых измерений и вектора состояния орбитальных параметров каталогизированных объектов) реализация обобщённого алгоритма идентификации может быть представлена в следующем виде.

Составляется список объектов $i \in [1, M)$, которые могли бы быть теоретически поставлены в соответствие выбранному вектору угловых измерений.

При выбранном прогнозе орбитального движения КО проводится прогнозирование вектора его орбитального состояния на момент проведения углового измерения и проецирование $G_2(X|t_0)$ в пространство Ω_X .

При известной функции измерения $l(x|X_0, W_{X_0})$ восстанавливается характеристика идентификации $n(\alpha)$.

При выбранном уровне доверия принятия решения в автоматическом режиме $\alpha_{авт}$ и выполнении условия $n(\alpha_{авт}) = 1$ принимается окончательное решение об идентификации углового измерения с соответствующим вектором состояния, значение которого уточняется.

В противном случае оператор проводит анализ полученных результатов обработки с целью принятия решения о плане её (обработки) дальнейшей реализации.

Примеры характеристик идентификации, восстановленные с использованием имитационного моделирования

В качестве примера на рис. 1 приведены характеристики идентификации, полученные с использованием имитационного моделирования. В качестве исходной орбиты была

выбрана орбита КО NORAD ID = 23439; (наименование “RADIO ROSTO” (“RS-15”)) с параметрами, взятыми с сайта CelesTrak [8], которая прогнозировалась на двое суток на интервал наблюдения КО в ночное время. Движение КО прогнозировалось с помощью точной модели движения, основанной на численном интегрировании уравнений движения. При этом учитывались все реальные возмущения орбиты, в том числе нецентральность и неравномерность гравитационного поля Земли, воздействие гравитации Луны и Солнца и сил светового давления. В качестве мешающих КО выбирались 200 КО из тех, чьи орбиты являлись ближайшими к опорной на момент проведения измерений. Ошибки узловых измерений моделировались с использованием нормального закона распределения с нулевым средним и дисперсиями, равными $\{0,1; 0,25; 0,5 \text{ и } 1,0\}$ угловых сек. соответственно.

Рисунок 1. Характеристики идентификации выбранного углового измерения, сформированного при наличии гауссовых ошибок

Анализ приведённых зависимостей, структура которых отражает типовую ситуацию, позволяет сделать вывод о возможности решения задачи идентификации угловых измерений в автоматическом режиме при условии, что СКО их измерений $\leq 0,5$ угловых секунд. В противном случае алгоритм их обработки должен определять аналитик.

Заключение

Синтезирован алгоритм идентификации угловых измерений с совокупностью орбитальных параметров каталогизированных КО. В основу алгоритма положен адаптивный байесов подход с использованием аддитивной функции потерь, что позволило свести задачу проверки много альтернативной гипотезы к независимой проверке совокупности двувальтернативных гипотез о принадлежности углового измерения к выбранному КО.

Введена характеристика идентификации, которая представляет собой количество КО, с которыми идентифицируется вектор угловых измерений при выбранном уровне доверия. Предложена реализация алгоритма, в основе которого анализ структуры характеристики идентификации.

С использованием имитационного моделирования приведён пример восстановления характеристики идентификации с использованием орбитальной информации по КО, опубликованной на сайте <https://celestrak.com/NORAD/elements/>. Алгоритм может быть использован при обработке угловых измерений, формируемых в обзорных оптико-электронных средствах наблюдения.

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

1. Тартаковский, Г. П. Теория информационных систем. – М.: Физматкнига, 2005. – 304 с.
2. Чернышев К. Р. Симметричные меры дивергенции вероятностных распределений и идентификация систем. ИПУ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. М. doi:10.18720/SPBPU/2/id20-153.
3. А. Е. Колесса, А. В. Пругло, С. С. Равдин Восстановление орбит по угловым измерениям Радиотехника №10 2005.
4. Chang C.B. Ballistic Trajectory Estimation with Angle-Only Measurements // IEEE Trans on AC, vol. AC-25, No 3, June 1980, pp. 474-480.
5. Прогноз орбитального движения космического аппарата. Численная модель. Электронный ресурс <https://docplayer.com/26524205-Prognoz-orbitalnogo-dvizheniya-kosmicheskogo-apparata-chislennaya-model.html>
6. Лавров В. В., Тестов А. В., Рындин К. Ю., Тюрин В. С. Устойчивый алгоритм выделения движущихся космических объектов и оценки их угловых координат на снимке звёздного неба, сформированном в условиях сложной фоновой обстановки. Изд. НИЦ «Л-Журнал» Тенденции развития науки и образования № 75-1 2021.
7. Фадеева Л. Н., Лебедев А. В., Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Эксмо, 2010. – 496 с. – (Новое экономическое образование).
8. Электронный ресурс <https://celestrak.com/NORAD/elements/>

Максимов Н.М., Головань И.Н., Корнякова О.Ю.

Возможность использования синхронной реактивной машины в качестве энергоэффективного электропривода

*Южно-Уральский государственный университет
(Россия, Челябинск)*

doi: 10.18411/trnio-12-2021-147

Аннотация

В статье затрагивается вопрос об энергосберегающем электроприводе. В качестве использования предлагается синхронная реактивная машина независимого возбуждения. Данная машина отличается от остальных электродвигателей многофазной статорной обмоткой, «холодным» ротором, простой конструкцией и ввиду этого высокой надежностью. С помощью программы SimInTech была смоделирована структурная схема СРМНВ, проведены соответствующие исследования.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина независимого возбуждения, структурная схема, математическая модель, SimInTech.

Abstract

The article touches upon the issue of an energy-saving electric drive. A synchronous reluctance machine of independent excitation is proposed for use. This machine differs from other electric motors by its multiphase stator winding, "cold" rotor, simple design and therefore high reliability. With the help of the SimInTech program, the structural diagram of the SRMNВ was modeled, and the corresponding studies were carried out.

Keywords: synchronous reactive machine of independent excitation, block diagram, mathematical model, SimInTech.

В настоящее время вопросу энергосбережения и энергоэффективности промышленного оборудования уделяется большое внимание [1]. Это обусловлено, во-первых, тарифом на электроэнергию, во-вторых, глобальными вопросами затрагивающими увеличивающийся уровень выбросов CO₂ при производстве электроэнергии [2]. Как показывает статистика, электрические двигатели потребляют около 70% всей электрической