
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

УДК 004.032.26
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-565-574

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕГО НАБЛЮДЕНИЙ С БОРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. М. АНАНЕНКО, А. Д. ГОЛЯКОВ, А. А. САСУНКЕВИЧ*

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия,
vka@mail.ru

Аннотация. Обоснована структура многослойной нейронной сети прямого распространения, предназначенной для определения параметров движения центра масс некооперируемого орбитального объекта по результатам измерений, проводимых с помощью оптико-электронной системы космического аппарата. В качестве измеряемых параметров выбраны зенитные расстояния орбитального объекта в характерных точках орбиты космического аппарата и время пролета орбитального объекта между этими точками. Установлена наименьшая продолжительность обучения при заданной точности определения параметров движения центра масс орбитального объекта. Представленные результаты могут быть использованы при обосновании и разработке систем автономного определения параметров движения центра масс орбитального объекта на основе бортовых оптических средств космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая система, орбитальный объект, параметры движения центра масс орбитального объекта, бортовые измерения, нейронная сеть

Ссылка для цитирования: Ананенко В. М., Голяков А. Д., Сасункевич А. А. Обоснование структуры нейронной сети для определения параметров движения орбитального объекта по результатам его наблюдений с борта космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 565—574. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-565-574.

SUBSTANTIATION OF THE NEURAL NETWORK STRUCTURE FOR DETERMINING AN ORBITAL OBJECT MOTION PARAMETERS BASED ON RESULTS OF ITS OBSERVATIONS FROM A SPACECRAFT

V. M. Ananenko, A. D. Golyakov, A. A. Sasunkevich*

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vka@mail.ru

Abstract. The structure of a multilayer neural network of direct propagation, designed to determine the motion parameters of the mass center of a non-cooperating orbital object by results of measurements carried out by a spacecraft optical-electronic system, is substantiated. The orbital object zenith distances at characteristic points of the spacecraft's orbit and the time of the orbital object's passage between these points were chosen as the measured parameters. The shortest duration of training for a given accuracy of determining the of the orbital object's center of mass motion parameters is determined. The presented results can be used in justification and development of systems for autonomous determination of the parameters of motion of the orbital object center of mass based on a spacecraft onboard optical means.

Keywords: spacecraft, onboard system, orbital object, motion parameters of orbital object mass center, onboard measurements, neural network

For citation: Ananenko V. M., Golyakov A. D., Sasunkevich A. A. Substantiation of the neural network structure for determining an orbital object motion parameters based on results of its observations from a spacecraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 565—574 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-565-574.

Введение. В настоящее время на околоземных орбитах находится значительное количество различных техногенных объектов в виде действующих космических аппаратов (КА) и способного нанести им ущерб „космического мусора“. Поэтому задача обеспечения безопасности выполняющих целевые функции КА, и в особенности пилотируемых орбитальных кораблей и станций, представляется исключительно актуальной.

С целью учета элементов космического мусора и прогнозирования их движения с необходимой точностью ведется каталог орбитальных объектов (ОО), совершающих движение в космическом пространстве [1]. Процесс составления каталога включает этап предварительного определения параметров движения (ПД) ОО, которые с течением времени уточняются. Оперативное решение этой задачи с применением наземных радиолокационных и оптических средств [2—4] не всегда представляется возможным. Поэтому для определения ПД центра масс ОО целесообразно использовать КА, в состав бортовой аппаратуры которого входит оптико-электронная система.

Одним из способов определения ПД ОО является рассмотренный, например, в работах [5—8] способ взаимной навигации, который основан на измерениях, проводимых с помощью оптико-электронных бортовых средств КА. Однако этот способ требует априорной информации о параметрах опорной орбиты ОО.

В отсутствие такой информации решается задача предварительного определения ПД ОО [9]. При решении этой задачи необходимо ввести достаточно значимые ограничения и допущения, например, совпадение плоскостей орбит КА и ОО [10] или нахождение только трех из шести ПД ОО [8].

Один из способов обойти перечисленные проблемы — использование искусственных нейронных сетей (НС), которые обладают адаптивными свойствами и способностью к самообучению. Вопросам применения НС в области анализа данных, получаемых от различных бортовых устройств летательных аппаратов, посвящены многочисленные исследования, например, работы [11—14]. Однако задача предварительного определения ПД ОО с помощью НС не получила своего решения.

Целью настоящей статьи является обоснование структуры НС, предназначенной для определения ПД ОО по результатам его наблюдений бортовыми оптико-электронными средствами КА.

Постановка задачи и принятые допущения. Для достижения поставленной цели введем следующие ограничения: движение КА и ОО происходит в центральном гравитационном поле Земли на круговых некомпланарных орбитах; параметры орбиты КА известны; радиус орбиты ОО больше радиуса орбиты КА; погрешности результатов измерений, выполняемых бортовыми средствами КА, отсутствуют; влияние атмосферы, притяжение Луны и давление солнечного ветра на КА и ОО не учитываются.

Ориентацию линии визирования (ЛВ) ОО бортовыми средствами КА определим в подвижной орбитальной системе координат (ПОСК) $n \tau b$, начало которой совмещено с центром масс КА (рис. 1). Оси ПОСК расположены в пространстве следующим образом: радиальная ось n является продолжением радиуса-вектора КА, нормальная ось b совпадает с нормалью к плоскости орбиты КА, трансверсальная ось τ лежит в плоскости орбиты КА и дополняет систему координат $n \tau b$ до правой.

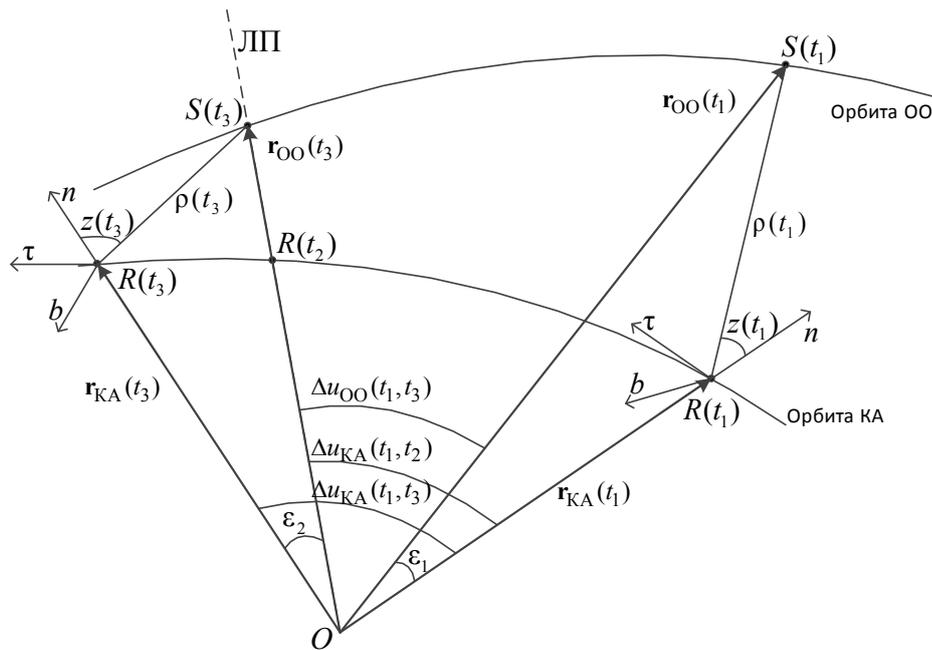


Рис. 1

Рассмотрим три момента времени t_1 , t_2 и t_3 . В момент времени t_1 проекция ЛВ ОО на трансверсальную ось τ равна нулю, момент времени t_2 соответствует моменту прохождения КА линии пересечения (ЛП) плоскостей орбит КА и ОО, в момент времени t_3 проекция ЛВ ОО на нормальную ось b равна нулю. Предположим, что бортовыми средствами КА фиксируются моменты времени t_1 и t_3 , в которые измеряются зенитные углы ЛВ $z(t_1)$ и $z(t_3)$.

Введем вектор измеряемых параметров $\Psi = [z(t_1) \ z(t_3) \ \Delta t]^T$, где Δt — интервал времени между моментами t_1 и t_3 : $\Delta t = t_3 - t_1$.

Поскольку движение ОО происходит по круговой орбите, искомый вектор ПД имеет вид $\mathbf{Q}_{OO} = [r_{OO} \ \Omega_{OO} \ i_{OO} \ \tau_{OO}]^T$, где r_{OO} — радиус орбиты ОО; Ω_{OO} — прямое восхождение восходящего узла орбиты ОО; i_{OO} — угол наклона орбиты ОО; τ_{OO} — время прохождения ОО восходящего узла.

Аналитическая зависимость между вектором измеряемых параметров Ψ и вектором искомых параметров \mathbf{Q}_{OO} отсутствует. Найдем решение этой задачи с помощью НС, состоящей из искусственных нейронов, которые соединены между собой так называемыми синапсами, обеспечивающими отправку и получение информации (сигналов) между нейронами.

Решение задачи. Построим НС в два этапа. На первом этапе выберем структуру НС и обоснуем векторы ее входных и выходных параметров. На втором этапе определим процедуру обучения НС.

Этап № 1. Вид структуры НС обуславливает ее способность выполнить заданные функции. Для поиска закономерностей между выходными сигналами НС с ее входными сигналами широко применяется многослойная НС прямого распространения [15—17]. Особенность этой НС состоит в том, что первый слой соединен со всеми входами НС. Каждый нейрон произвольного слоя связан со всеми нейронами предыдущего слоя. Поскольку такая НС не содержит петель, в ней реализован процесс прямого распространения сигнала.

Для решения поставленной задачи воспользуемся многослойной НС прямого распространения [15].

Входными параметрами НС являются элементы трехмерного вектора Ψ . Введем вектор выходных параметров НС $\Theta = [\Delta u_{КА}(t_1, t_2) \ \Lambda \ r_{ОО}]^T$, где $\Delta u_{КА}(t_1, t_2)$ — угол между радиусами-векторами КА в моменты времени t_2 и t_1 : $\Delta u_{КА}(t_1, t_2) = u_{КА}(t_2) - u_{КА}(t_1)$; $u_{КА}(t_j)$ — аргумент широты КА в момент времени t_j ; Λ — угол между плоскостями орбит КА и ОО. Покажем, что между вектором Θ выходных параметров НС и вектором $Q_{ОО}$ искомых ПД ОО существует аналитическая зависимость $Q_{ОО} = F(\Theta)$.

Рассмотрим изображенные на рис. 2 проекции орбит КА и ОО на небесную сферу. На рис. 2 введены следующие обозначения: $\Delta\Omega$ — разность прямых восхождений восходящих узлов орбит ОО ($\Omega_{ОО}$)* и КА ($\Omega_{КА}$): $\Delta\Omega = \Omega_{ОО} - \Omega_{КА}$; $i_{КА}$ и $i_{ОО}$ — углы наклона орбиты КА и ОО; Δi — угол, смежный с углом наклона орбиты ОО: $\Delta i = \pi - i_{ОО}$; $R(t_j)$ и $S(t_j)$ — положения на небесной сфере соответственно КА и ОО в момент времени t_j , $j = 1, 2, 3$; $u_{ОО}(t_3)$ — аргумент широты ОО в момент времени t_3 .

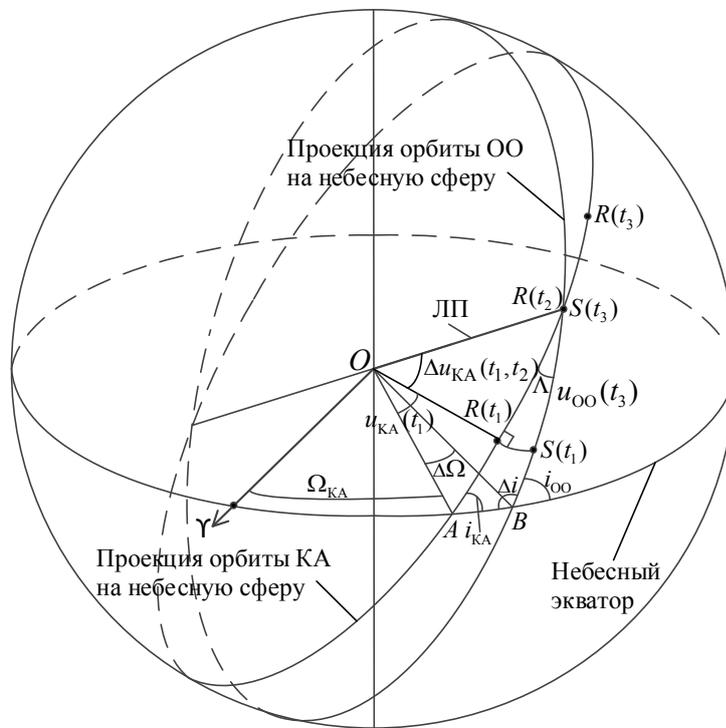


Рис. 2

Найдем угол наклона орбиты ОО ($i_{ОО}$). Для решения этой задачи рассмотрим сферический треугольник $ABS(t_3)$, изображенный на рис. 2. Согласно теореме косинусов сферической тригонометрии получим:

$$\cos \Delta i = -\cos i_{КА} \cos \Lambda + \sin i_{КА} \sin \Lambda \cos(u_{КА}(t_1) + \Delta u_{КА}(t_1, t_2)). \tag{1}$$

Поскольку $\Delta i = \pi - i_{ОО}$, из выражения (1) находим:

$$\cos(\pi - i_{ОО}) = -\cos i_{КА} \cos \Lambda + \sin i_{КА} \sin \Lambda \cos(u_{КА}(t_1) + \Delta u_{КА}(t_1, t_2)), \tag{2}$$

откуда угол наклона орбиты ОО определяем из соотношения

* Угол $\Omega_{ОО}$ на рис. 2 не показан.

$$i_{OO} = \arccos(\cos i_{KA} \cos \Lambda - \sin i_{KA} \cos(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)) \sin \Lambda). \quad (3)$$

Поскольку орбиты КА и ОО некомпланарные ($\Lambda \neq 0$), то для определения прямого восхождения восходящего узла орбиты ОО (Ω_{OO}) из сферического треугольника $ABS(t_3)$, который изображен на рис. 2, по теореме синусов сферической тригонометрии при условии, что $\Delta i \neq \pi$, находим

$$\frac{\sin \Delta \Omega}{\sin \Lambda} = \frac{\sin(\Omega_{OO} - \Omega_{KA})}{\sin \Lambda} = \frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2))}{\sin \Delta i}. \quad (4)$$

Из выражения (4) получаем формулу для расчета прямого восхождения восходящего узла орбиты ОО:

$$\Omega_{OO} = \Omega_{KA} + \arcsin\left(\frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)) \sin \Lambda}{\sin i_{OO}}\right). \quad (5)$$

Найдем время прохождения ОО восходящего узла (τ_{OO}). Из сферического треугольника $ABS(t_3)$ по теореме синусов сферической тригонометрии при условии, что $i_{KA} \neq 0$, находим

$$\frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2))}{\sin \Delta i} = \frac{\sin u_{OO}(t_3)}{\sin i_{KA}}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) после несложных преобразований получаем формулу для расчета аргумента широты ОО в момент времени t_3 :

$$u_{OO}(t_3) = \arcsin\left(\frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)) \sin i_{KA}}{\sin i_{OO}}\right), \quad (7)$$

откуда находим время прохождения ОО восходящего узла

$$\tau_{OO} = t_3 - \frac{u_{OO}(t_3)}{\omega_{OO}}, \quad (8)$$

где $\omega_{OO} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{OO}^3}}$ — орбитальная угловая скорость ОО; $\mu = 3,98602 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — гравитационный параметр Земли.

Таким образом, выражения (3), (5), (7) и (8) представляют аналитическую зависимость $\mathbf{Q}_{OO} = \mathbf{F}(\Theta)$ между вектором Θ выходных параметров НС и вектором \mathbf{Q}_{OO} искомым ПД ОО.

Этап № 2. Обучение НС основано на синтезе функции \mathbf{G} , которая связывает выходной и входной векторы НС (Θ и Ψ) с заданной точностью, т.е. $\Theta = \mathbf{G}(\Psi)$.

Для формирования обучающей выборки НС используем функцию \mathbf{G}^{-1} , которая является обратной функцией \mathbf{G} . Найдем обратную зависимость $\Psi = \mathbf{G}^{-1}(\Theta)$.

Предположим, что известны компоненты вектора $\Theta = [\Delta u_{KA}(t_1, t_2) \ \Lambda \ r_{OO}]^T$. Введем углы $\varepsilon(t_1)$ и $\varepsilon(t_3)$ между радиусами-векторами КА и ОО в моменты времени t_1 и t_3 соответственно (см. рис. 1).

Для поиска угла $\varepsilon(t_1)$ рассмотрим фрагмент небесной сферы в области ЛП плоскостей орбит КА и ОО, который изображен на рис. 3

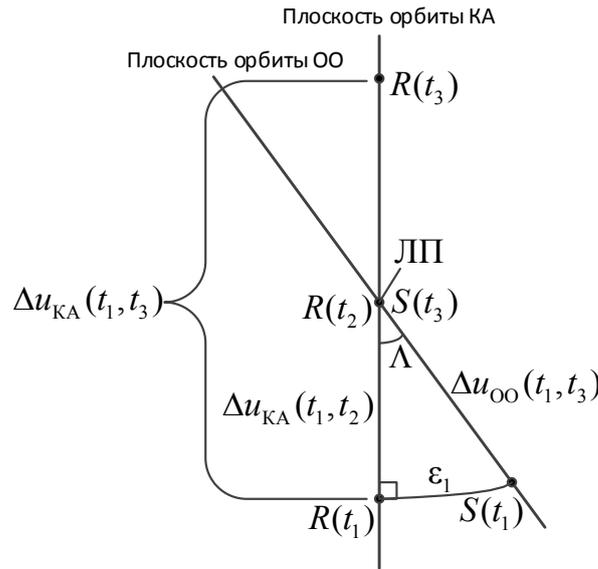


Рис. 3

Из сферического треугольника $R(t_1)S(t_1)S(t_3)$, у которого угол при вершине $R(t_1)$ — прямой, по теореме синусов получаем:

$$\frac{\sin \varepsilon(t_1)}{\sin \Lambda} = \sin \Delta u_{OO}(t_1, t_3), \tag{9}$$

где $\Delta u_{OO}(t_1, t_3)$ — разность аргументов широты ОО в моменты времени t_3 и t_1 :

$$\Delta u_{OO}(t_1, t_3) = u_{OO}(t_3) - u_{OO}(t_1).$$

Можно показать, что справедливо равенство

$$\Delta u_{OO}(t_1, t_3) = \arcsin \frac{\operatorname{tg} \Delta u_{KA}(t_1, t_2)}{\cos \Lambda}, \tag{10}$$

где $\Delta u_{KA}(t_1, t_2)$ — разность аргументов широты КА в моменты времени t_2 и t_1 :

$$\Delta u_{KA}(t_1, t_2) = u_{KA}(t_2) - u_{KA}(t_1).$$

На основании соотношений (9) и (10) угол $\varepsilon(t_1)$ между радиусами-векторами КА и ОО в момент времени t_1 находим из выражения

$$\varepsilon(t_1) = \arcsin(\sin(\Delta u_{OO}(t_1, t_3)) \sin(\Lambda)). \tag{11}$$

Для определения угла $\varepsilon(t_2)$ запишем равенство (см. рис. 1):

$$\varepsilon(t_2) = \Delta u_{KA}(t_1, t_3) - \Delta u_{KA}(t_1, t_2), \tag{12}$$

где $\Delta u_{KA}(t_1, t_3)$ — разность аргументов широты КА в моменты времени t_3 и t_1 :

$$\Delta u_{KA}(t_1, t_3) = u_{KA}(t_3) - u_{KA}(t_1) = \omega_{KA} \Delta t;$$

$\omega_{KA} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{KA}^3}}$ — орбитальная угловая скорость КА; Δt — интервал между моментами времени t_3 и t_1 :

$$\Delta t = t_3 - t_1 = \frac{\Delta u_{OO}(t_1, t_3)}{\omega_{OO}}$$

Зенитные углы ОО $z(t_1)$ и $z(t_3)$ в моменты времени t_1 и t_3 (см. рис. 1) получим из выражений:

$$z(t_j) = \pi - \arccos \frac{r_{OO}^2 - r_{KA}^2 - 2\rho^2(t_j)}{-2r_{KA}\rho(t_j)}, \quad j=1,3, \tag{13}$$

где $\rho(t_j)$ — расстояние между КА и ОО в момент времени t_j :

$$\rho(t_j) = \sqrt{r_{KA}^2 + r_{OO}^2 - 2r_{KA}r_{OO} \cos \varepsilon(t_j)}.$$

Таким образом, искомая функция \mathbf{G}^{-1} в виде соотношений (11)—(13) получена.

Исследуем влияние структуры многослойной НС прямого распространения на точность определения ПД ОО.

Для решения поставленной задачи сформированы девять вариантов структур многослойных НС прямого распространения с тремя входами, тремя выходами и равным количеством нейронов в каждом скрытом слое. Структура НС представлена на рис. 4, где k — число скрытых слоев, m — число нейронов в скрытом слое. Общее число нейронов в сформированных структурах для проведения исследования выбрано равным 36. Варианты структур НС имеют следующие соотношения числа скрытых слоев и числа нейронов в этих слоях ($k \times m$): $1 \times 36, 2 \times 18, 3 \times 12, 4 \times 9, 6 \times 6, 9 \times 4, 12 \times 3, 18 \times 2, 36 \times 1$.

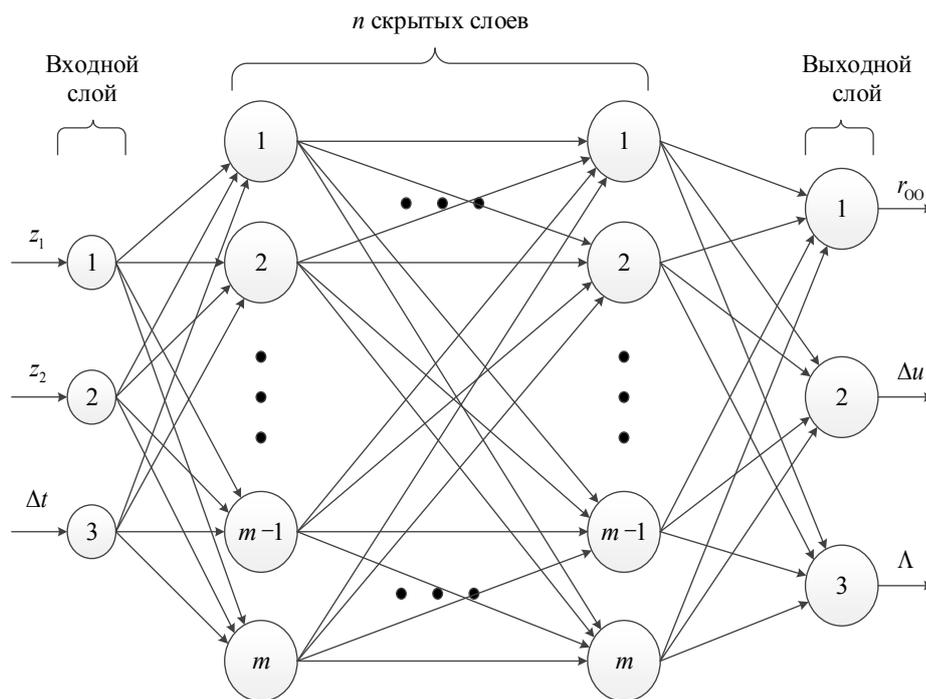


Рис. 4

На три нейрона входного слоя поступают измеренные параметры, с трех выходов снимается информация о выходных параметрах, которые получены по результатам работы НС.

Для всех вариантов структур НС использованы идентичные обучающая и тестовая выборки, включающие измеренные и выходные параметры НС. Погрешность определения ПД ОО (Δ) найдена по среднему для всей совокупности тестовой выборки значению расстояния между истинным положением центра масс ОО и определенным по бортовым измерениям.

Исследование проведено с использованием программного комплекса, разработанного в среде Matlab-Simulink, структура которого представлена на рис. 5.

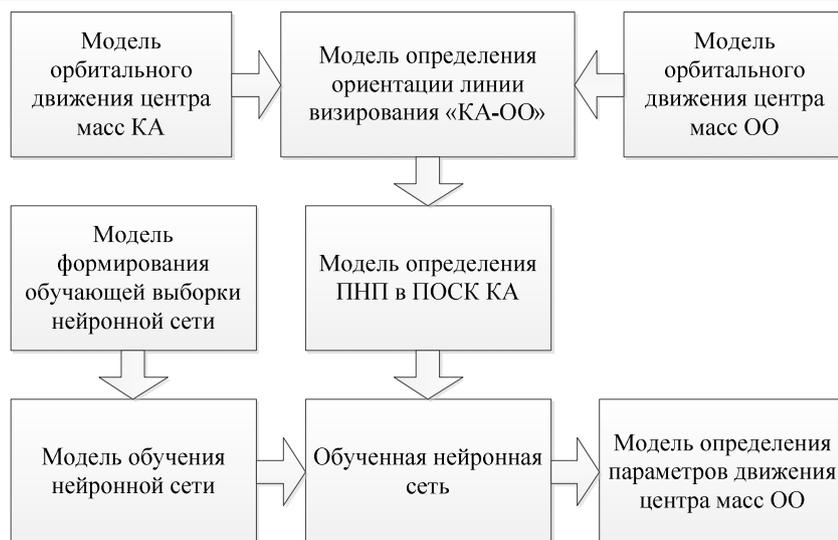


Рис. 5

Результаты исследования влияния различных структур НС на погрешность определения ПД ОО и время обучения НС представлены в таблице. Обучение различных структур НС проведено в течение 900 циклов. Время обучения исследуемых структур НС сравнивалось с наименьшим временем, которое принято за 100 %.

№ п/п	k	m	Общее число входов нейронов	Погрешность определения ПД ОО, км	Относительное время обучения нейросети, %
1	1	36	144	14,94	138
2	2	18	396	17,49	369
3	3	12	336	15,69	255
4	4	9	279	41,97	190
5	6	6	204	82,65	147
6	9	4	144	339,43	105
7	12	3	111	320,00	107
8	18	2	76	350,78	100
9	36	1	39	282,10	127

Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что при равном количестве нейронов в сети погрешность определения ПД ОО ниже у сетей с меньшим числом слоев и соответственно — большим числом нейронов в слое (строки 1, 2, 3 таблицы). Характерной особенностью таких структур является большее общее число входов нейронов (синапсов), по сравнению с другими вариантами, при этом продолжительность обучения таких НС увеличивается.

Исследовано влияние числа циклов обучения НС (N) на погрешность определения ПД ОО с использованием сети с тремя скрытыми слоями и 12 нейронами в слое (рис. 6). Опыты проведены с $N = 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900$. Как видно из рисунка, после 300 циклов обучения значительного улучшения точности определения ПД ОО уже не происходит, что позволяет сократить время на обучения НС.

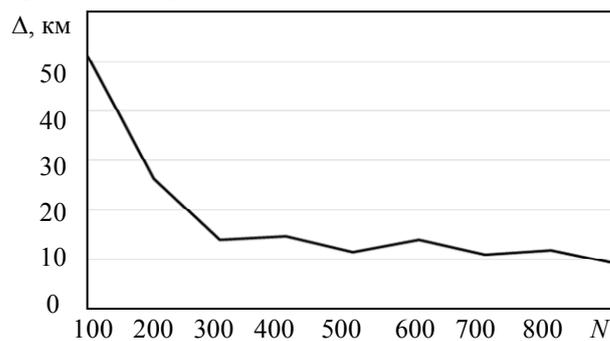


Рис. 6

Заключение. Для обеспечения безопасности функционирования КА на орбите необходимо оперативно определять параметры движения различных ОО, в том числе „космического мусора“. Такую задачу не всегда можно решить наземными средствами.

В настоящей работе для решения этой задачи использованы результаты бортовых измерений движения ОО относительно КА. Полученные данные предложено обрабатывать с помощью многослойной НС прямого распространения.

Проанализировано влияние различных типов структур НС на погрешность определения ПД ОО. Установлено, что наименьшую (из рассмотренных структур НС) погрешность определения ПД ОО имеет НС с одним скрытым слоем из 36 нейронов.

Представленные результаты могут найти применение при разработке бортовых систем определения параметров движения ОО в целях обеспечения безопасности полетов КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторовский З. Н. Ведение каталога космических объектов // Космические исследования. 1993. Т. 31, вып. 4. С. 101—114.
2. Брандин В. Н., Разоренов Г. Н. Определение траекторий космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
3. Минаков Е. П., Власов Р. П. Алгоритм обработки траекторной информации уточнения параметров движения объектов по одновременным двукратным измерениям двумя космическими аппаратами роторного типа // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 184—191.
4. Глуценко А. А., Хохлов В. П. Алгоритм идентификации изменений и уточнения параметров движения техногенного объекта в околоземном космическом пространстве на основе радиолокационных измерений // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 12. С. 164—170.
5. Голяков А. Д. Введение в теорию взаимной навигации искусственных спутников Земли. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1992. 142 с.
6. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. Монография. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 453 с.
7. Аншаков Г. П., Голяков А. Д., Петрищев В. Ф., Фурсов В. А. Автономная навигация космических аппаратов. Самара: Гос. науч.-произв. ракетно-космический центр „ЦСКБ-Прогресс“, 2011. 486 с.
8. Голяков А. Д., Ананенко В. М., Фоминов И. В. Системы навигации летательных аппаратов. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. 273 с.
9. Трещалин А. П. Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных объектов // Труды МФТИ. 2012. Т. 4, № 3. С. 122—131.
10. Ананенко В. М., Голяков А. Д., Калабин П. В. Метод предварительного решения задачи навигации космического робота по бортовым астрономическим измерениям с использованием фильтра Баттерворта // Вестн. Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 2. С. 7—18.
11. Суханов Н. В. Схема управления летательным аппаратом на основе нейронных сетей // Электронный журнал „Труды МАИ“. 2013. Вып. 65 [Электронный ресурс]: <<http://trudymai.ru/published.php?ID=36013>>.
12. Кореванов С. И., Казин В. В. Искусственные нейронные сети в задачах навигации беспилотных летательных аппаратов // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2014. № 201. С. 46—49.
13. Воронцов В. А., Федоров Е. А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. 2015. Вып. 82 [Электронный ресурс]: <<https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>>.
14. Михайлин Д. А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 04. С. 18—24.
15. Саттон Р. С., Барто Э. Дж. Обучение с подкреплением / Пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.

16. Горбачевская Е. Н. Классификация нейронных сетей // Вестн. Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2012. Вып. 2 (19). С. 23—24.
17. Богославский С. Н. Область применения искусственных нейронных сетей и перспективы их развития // Науч. журн. КубГАУ. 2007. № 27(3). С. 228—238.

Сведения об авторах

- Владимир Михайлович Ананенко** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; старший преподаватель; E-mail: avm-brok@mail.ru
- Алексей Дмитриевич Голяков** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; профессор; E-mail: algol1949@mail.ru
- Александр Анатольевич Сасункевич** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; E-mail: saa-soso@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.05.22; одобрена после рецензирования 25.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

- Hutorovsky Z.N. *Space Research*, 1993, no. 4(31), pp. 101–114. (in Russ.)
- Brandin V.N., Razorenov G.N. *Opredeleniye trayektoriy kosmicheskikh apparatov* (Determination of Spacecraft Trajectories), Moscow, 1978, 216 p. (in Russ.)
- Minakov E.P., Vlasov R.P. *Proceedings of the Tula State University, Technical Sciences*, 2019, no. 3, pp. 184–191. (in Russ.)
- Glushchenko A.A., Khokhlov V.P. *Proceedings of Tula State University, Technical Sciences*, 2021, no. 12, pp. 164–170. (in Russ.)
- Golyakov A.D. *Vvedeniye v teoriyu vzaimnoy navigatsii iskusstvennykh sputnikov Zemli* (Introduction to the Theory of Mutual Navigation of Artificial Earth Satellites), St. Petersburg, 1992, 142 p. (in Russ.)
- Kuznetsov V.I. *Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy metodov i algoritmov avtonomnoy navigatsii i oriyentatsii kosmicheskikh apparatov* (Automated System of Scientific Research of Methods and Algorithms of Autonomous Navigation and Orientation of Spacecraft), St. Petersburg, 2010, 453 p. (in Russ.)
- Anshakov G.P., Golyakov A.D., Petrishchev. V.F., Fursov V.A. *Avtonomnaya navigatsiya kosmicheskikh apparatov* (Autonomous Navigation of Spacecraft), Samara, 2011, 486 p. (in Russ.)
- Golyakov A.D., Ananenko V.M., Fominov I.V. *Sistemy navigatsii letatel'nykh apparatov* (Aircraft Navigation Systems), St. Petersburg, 2018, 273 p. (in Russ.)
- Treshchalin A.P. *Proceedings of the MIPT*, 2012, no. 3(4), pp. 122–131. (in Russ.)
- Ananenko V.M., Golyakov A.D., Kalabin P.V. *Vestnik of Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*, 2020, no. 2(19), pp. 7–18. (in Russ.)
- Sukhanov N.V. *Proceedings of the MAI*, 2013, no. 65, <http://trudymai.ru/published.php?ID=36013>. (in Russ.)
- Korevanov S.I., Kazin V.V. *Scientific Vestnik of MSTU GA*, 2014, no. 201, pp. 46–49. (in Russ.)
- Vorontsov V.A., Fedorov E.A. *Proceedings of MAI*, 2015, no. 82. <https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>. (in Russ.)
- Mikhailin D.A. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2017, no. 04(20), pp. 18–24. (in Russ.)
- Sutton R.S., Barto Andrew G. *Reinforcement learning*, Cambridge, Mass MIT Press, 2018.
- Gorbachevskaya E.N. *Bulletin of Volga University named after V.N. Tatishchev*, 2012, no. 2(19), pp. 23–24. (in Russ.)
- Bogoslavskiy S.N. *Scientific Journal of KubGAU*, 2007, no. 3(27), pp. 228–238. (in Russ.)
- Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivye sistemy* (The Self-Checked Devices and Failure-Safe Systems), Moscow, 1989, 208 p. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir M. Ananenko** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; Senior Lecturer; E-mail: avm-brok@mail.ru
- Alexey D. Golyakov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; Professor; E-mail: algol1949@mail.ru
- Alexander A. Sasunkevich** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; E-mail: saa-soso@rambler.ru

Received 05.05.22; approved after reviewing 25.05.22; accepted for publication 21.06.22.