

УДК 621.391; 629.78
DOI: 10.47148/1609-364X-2021-1-30-35

© Коллектив авторов

С.В. Соколов, И.Н. Розенберг, А.А. Баяндурова, Н.А. Духина

Высокоточное позиционирование на локсодромической траектории по навигационным измерениям с интенсивными помехами

Аннотация. В статье предлагается метод повышения точности определения текущих координат подвижного объекта, движущегося по локсодромической траектории, за счет аналитического трехмерного проецирования его координат, определенных по навигационным измерениям в условиях интенсивных помех, на траекторию его истинного движения. Приводятся результаты проверки эффективности использования предложенного метода, которая проводилась путем численного моделирования описанных в работе алгоритмов определения координат объекта на локсодромической траектории по зашумленным навигационным измерениям. Результаты свидетельствуют о возможности эффективного использования предложенного подхода.

Ключевые слова: аналитическое трехмерное проецирование координат, геоинформационные системы, интенсивные помехи, локсодромическая траектория, навигационные измерения.

S.V. Sokolov, I.N. Rosenberg, A.A. Bayandurova, N.A. Duhina

Precise positioning is known as a loxodrome on a trajectory on navigation measurements with intense noise

Abstract. The article proposes a method of improving the accuracy of determining the current coordinates of a moving object moving along a loxodromic trajectory by analytical three-dimensional projection of its coordinates determined by navigation measurements in conditions of intense interference on the trajectory of its true motion. The results of testing the efficiency of the proposed method, which was carried out by numerical simulation of the algorithms described in the work of determining the coordinates of the object on the loxodromic trajectory on noisy navigation measurements. The results indicate the possibility of effective use of the proposed approach.

Keywords: analytical three-dimensional projection coordinates, geographic information systems, interference, known as a loxodrome path, navigation measurement.

Поступила 07.10.2020
Доработана 28.01.2021

Принята к печати 01.03.2021

Введение

В рамках утвержденной Правительством РФ Программы «Цифровая экономика Российской Федерации» большое внимание уделяется решению вопроса обеспечения потребностей граждан, бизнеса и власти в части пространственных данных и данных ДЗЗ из космоса. При анализе потребностей цифровой экономики в этой сфере можно выявить, что ключевые позиции занимает получение сведений о движущихся объектах с применением инновационных технологий определения их местоположения с последующим отображением на геоподоснове. В настоящее время большое число видов транспортных средств движется по известным с высокой точностью пространственным траекториям – автомобильный,

железнодорожный транспорт, самолеты гражданской авиации и пр. При этом очевидно, что использование дополнительной информации о траектории движения объекта существенно увеличивает точность определения его навигационных параметров [1-7]. Для численно-аналитического описания траекторий движения таких объектов и отображения их на геоинформационной подоснове, задаваемой в цифровом виде электронных карт, используется, как правило, их интервальная аппроксимация или локсодромическими, или ортодромическими траекторными отрезками [4-10]. При подобном задании траектории точность определения местоположения объекта может быть существенно увеличена за счет проецирования точки его текущего местоположения,

определенной по зашумленным измерениям навигационной системы, на соответствующий траекторный отрезок. Но при описании траектории ортодромией необходимо знать координаты конечной точки аппроксимирующего отрезка и контролировать точное время ее прохождения, что в ряде случаев может оказаться трудновыполнимо. В этом отношении аппроксимация траектории локсодромическими отрезками оказывается более эффективной, т.к. здесь достаточно знать, помимо координат начальной точки, только текущий азимутальный угол, который достаточно просто контролируется бортовыми средствами измерения [11, 12]. В связи с этим, оказывается актуальным решение задачи точного трехмерного проецирования координат подвижного объекта, определенных по зашумленным измерениям навигационной системы, на истинную пространственную траекторию его движения при ее аппроксимации локсодромическими отрезками. Далее решение этой задачи проведем для двух случаев описания траектории движения подвижного объекта – в географической и геоцентрической (гринвичской) $0\xi\eta\zeta$ системах координат (рис. 1) [2, 11, 12].

Постановка задачи

Для решения поставленной задачи сформулируем ее как задачу определения географических (λ, φ) или, соответственно, геоцентрических (ξ, η, ζ) координат точки пересечения **D** кратчайшей линии, проведенной на сфере Земли из точки **C** текущего местоположения подвижного объекта, определенной по измерениям навигационной системы, с локсодромической траекторией **FG**, аппроксимирующей текущий интервал траектории его движения (рис. 1).

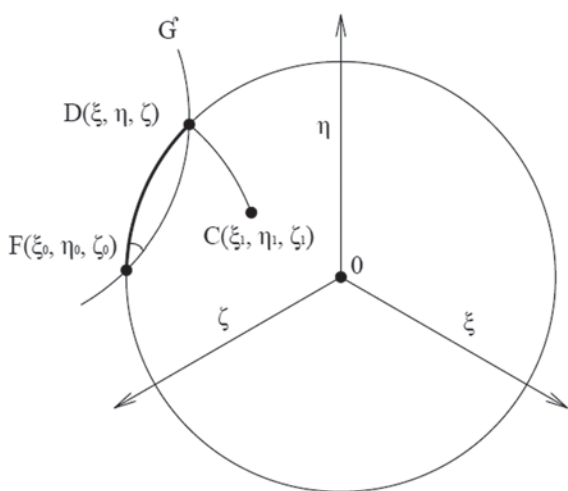


Рис. 1. Траектория движения подвижного объекта

Fig. 1. The trajectory of the moving object

Решение задачи в географической системе координат

Так как кратчайшая линия **CD**, проведенная на сфере Земли из точки **C** с координатами (λ_1, φ_1) , определенными по измерениям, до точки пересечения **D** с искомыми координатами (λ, φ) с траекторией **FG**, является ортодромией, то ее длина d определяется известным выражением [2, 11]:

$$\cos d = \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda). \quad (1)$$

При последующем решении учтем, что координаты (λ, φ) точки **D** принадлежат локсодромии, для которой справедлива их аналитическая зависимость:

$$\lambda = \lambda_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| \right), \quad (2)$$

где λ – текущая долгота подвижного объекта, λ_0 – начальное значение долготы отрезка траектории с постоянным известным курсовым углом A (долгота точки начала движения), φ – текущая широта,

$C = \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_0}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|^{-1} = \operatorname{const}$, φ_0 – начальное значение широты отрезка траектории с постоянным известным курсовым углом A .

Для определения значения переменной φ , обеспечивающего минимальное значение функции $\cos d$ – т.е. минимальную длину ортодромического отрезка **CD**, продифференцируем (1) по φ , имея при этом в виду, что $\frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} = \frac{\operatorname{tg} A}{\cos \varphi}$, и приравняем

полученное выражение к нулю:

$$\frac{\partial \cos d}{\partial \varphi} = 0 \Rightarrow \cos \varphi \cdot \sin \varphi_1 - \sin \varphi \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) + \quad (3)$$

$$+ \cos \varphi_1 \cdot \sin(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) \cdot \operatorname{tg} A = 0.$$

Решение уравнения (3) возможно только с использованием численных методов, что на сегодняшний день хотя и не вызывает трудностей, но не во всех практических случаях оказывается удобным. С этой целью линеаризуем левую часть (3) в окрестности некоторого значения широты φ_* (выбор которого проанализирован ниже), имея в результате следующее уравнение:

$$N(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_*, A) + M(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_*, A) \Delta \varphi = 0,$$

где $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_*$, φ – искомое значение широты;

$$N(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_*, A) = \cos \varphi_* \cdot \sin \varphi_1 - \sin \varphi_* \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_*}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) +$$

$$+ \cos \varphi_1 \cdot \sin(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_*}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) \cdot \operatorname{tg} A;$$

$$M(\varphi_p, \lambda_1, \varphi_*, A) = -\sin \varphi_* \sin \varphi_1 - \cos \varphi_* \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_*}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) - \sin \varphi_* \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_*}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) \cdot \frac{\operatorname{tg} A}{\cos \varphi_*} - \cos \varphi_1 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_0 - \operatorname{tg} A \cdot \ln(C \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_*}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|)) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 A}{\cos \varphi_*}.$$

Так как точность решения данного уравнения

$$\varphi = -\frac{N(\varphi_p, \lambda_1, \varphi_*, A)}{M(\varphi_p, \lambda_1, \varphi_*, A)} + \varphi_*$$

определяется степенью близости выбранной точки линеаризации φ_* к истинному значению широты φ , то рассмотрим два варианта такого выбора.

К первому варианту отнесем случай малых помех измерения, когда измеренное значение φ_1 незначительно отличается от φ (не более угловой секунды). Здесь можно положить $\varphi_* = \varphi_1$ и записать искомое решение следующим образом:

$$\varphi = \varphi_1 - \frac{N(\varphi_1, \lambda_1, A)}{M(\varphi_1, \lambda_1, A)}. \tag{4}$$

Во втором варианте помехи измерения считаем достаточно интенсивными φ (единицы и более угловых секунд), поэтому в качестве точки линеаризации выбираем значение истинной широты, определенное на предыдущем, $(k-1)$ -м, шаге вычислений – φ_{k-1} . В этом случае приходим к вычислению нелинейной рекурсии:

$$\varphi_k = -\frac{N(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_{k-1}, A)}{M(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_{k-1}, A)} + \varphi_{k-1}, \tag{5}$$

где φ_k – текущее значение истинной широты (полученное на k -м шаге измерений), при этом начальное значение φ_0 (широта точки начала движения) известно точно.

После определения текущего значения истинной широты по алгоритмам (4) или (5) долгота местоположения объекта находится по соотношению (2).

Очевидно, что реализация алгоритмов (4), (5) в реальном времени на борту объекта для современных вычислителей никаких трудностей не представляет.

Решение задачи в геоцентрической системе координат

Аналитическая зависимость долготы и широты (2) в географической системе координат позволяет получить аналогичную зависимость и для геоцентрических координат ξ, ζ, η на локсодромии [13]:

$$\xi(\eta) = \sqrt{r^2 - \eta^2} \cdot \sin \left[P_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(P \sqrt{\left| \frac{r - \eta}{r + \eta} \right|} \right) \right],$$

$$\zeta(\eta) = \sqrt{r^2 - \eta^2} \cdot \cos \left[P_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(P \sqrt{\left| \frac{r - \eta}{r + \eta} \right|} \right) \right],$$

$$P_0 = \operatorname{arctg} \frac{\xi_0}{\zeta_0}, \quad P = \sqrt{\frac{r + \eta_0}{r - \eta_0}}, \tag{6}$$

где ξ_0, ζ_0, η_0 – геоцентрические координаты точки начала движения, r – радиус Земли.

Для возможности представления длины ортодромии **CD** в геоцентрических координатах раскроем выражение (1) и, используя известную связь геоцентрических и географических координат:

$$\xi = r \cos \varphi \sin \lambda, \quad \eta = r \sin \varphi, \quad \zeta = r \cos \varphi \cos \lambda, \tag{7}$$

получаем:

$$\begin{aligned} \cos d &= \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 + \\ &+ \cos \varphi \cdot \sin \lambda \cdot \sin \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1 = \\ &= \frac{\eta}{r} \cdot \sin \varphi_1 + \frac{\zeta}{r} \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 + \frac{\xi}{r} \cdot \sin \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1 = \frac{\xi \xi_1 + \eta \eta_1 + \zeta \zeta_1}{r^2} \end{aligned}$$

где ξ_1, η_1, ζ_1 – геоцентрические координаты точки **C**, определенные по измерениям.

Для определения значения переменной η , обеспечивающего минимальную длину ортодромического отрезка **CD**, продифференцируем $\cos d$ по η и приравняем полученное выражение к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos d}{\partial \eta} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial (\xi \xi_1 + \eta \eta_1 + \zeta \zeta_1)}{\partial \eta} = 0 \Rightarrow \\ \frac{1}{\sqrt{r^2 - \eta^2}} &\left\{ \left(\zeta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} A}{P} - \xi_1 \cdot \eta \right) \sin \left[P_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(P \sqrt{\left| \frac{r - \eta}{r + \eta} \right|} \right) \right] - \right. \\ &\left. - \left(\xi_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} A}{P} + \zeta_1 \cdot \eta \right) \cos \left[P_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(P \sqrt{\left| \frac{r - \eta}{r + \eta} \right|} \right) \right] \right\} + \eta_1 = 0. \tag{8} \end{aligned}$$

Решение уравнения (8) возможно только с использованием численных методов, поэтому, как и ранее, линеаризуем левую часть (8) в окрестности некоторого значения η_* , получая в результате линейное уравнение:

$$N(\xi_1, \zeta_1, \eta_1, \operatorname{tg} A, P, P_0, \eta_*) + M(\xi_1, \zeta_1, \operatorname{tg} A, P, P_0, \eta_*) \Delta \eta = 0, \tag{9}$$

где

$$\begin{aligned} N(\xi_1, \zeta_1, \eta_1, \operatorname{tg} A, P, P_0, \eta_*) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{r^2 - \eta_*^2}} \left\{ \left(\zeta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} A}{P} - \xi_1 \cdot \eta_* \right) \sin \left[P_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(P \sqrt{\left| \frac{r - \eta_*}{r + \eta_*} \right|} \right) \right] - \right. \\ &\left. - \left(\xi_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} A}{P} + \zeta_1 \cdot \eta_* \right) \cos \left[P_0 + \operatorname{tg} A \cdot \ln \left(P \sqrt{\left| \frac{r - \eta_*}{r + \eta_*} \right|} \right) \right] \right\} + \eta_1, \end{aligned}$$

$$M(\xi_1, \zeta_1, \text{tg}A, P, P_0, \eta_*) = -\frac{r^2 + (\frac{\text{tg}A}{P})^2}{r^2 - \eta_*^2} \cdot \sin \left[P_0 + \text{tg}A \cdot \ln \left(P \sqrt{\frac{r - \eta_*}{r + \eta_*}} \right) + \text{arctg} \frac{\zeta_1}{\xi_1} \right].$$

Решая (9) и производя выбор точки линеаризации η_* в соответствии с приведенными выше рассуждениями, имеем следующие варианты расчета текущих координат объекта в геоцентрической системе координат:

$$\eta = \eta_1 - \frac{N(\xi_1, \zeta_1, \eta_1, \text{tg}A, P, P_0)}{M(\xi_1, \zeta_1, \text{tg}A, P, P_0, \eta_1)}$$

для случая помех малой интенсивности,

$$\eta = \eta_{k-1} - \frac{N(\xi_1, \zeta_1, \eta_{k-1}, \text{tg}A, P, P_0, \eta_{k-1})}{M(\xi_1, \zeta_1, \text{tg}A, P, P_0, \eta_{k-1})} \quad (10)$$

для случая помех большой интенсивности, при этом остальные координаты ξ, ζ рассчитываются по соотношениям (6).

Пример. Проверка эффективности использования предложенного подхода проводилась путем численного моделирования описанных выше алгоритмов определения координат объекта на локсодромической траектории по зашумленным навигационным измерениям. Координаты точки начала движения были определены как $\varphi_0 = 45^\circ, \lambda_0 = 37^\circ$ ($\xi_0 = 2711159,9$ м; $\eta_0 = 4504972,3$ м; $\zeta_0 = 3597828,6$ м) азимутальный (курсовой) угол $A = 24^\circ$, при этом на всей локсодромической траектории были определены 10 контрольных точек истинного положения объекта через одинаковые интервалы по широте φ , равные 10 угл. сек (долгота λ контрольных точек рассчитывалась при этом по формуле (2), координаты η, ξ, ζ – по соотношениям (7)). Моделирование зашумленных измерений координат объекта, т.е. формирование значений (φ_1, λ_1) и (ξ_1, η_1, ζ_1) , осуществлялось аддитивным наложением гауссовских централизованных случайных последовательностей со среднеквадратическими отклонениями $\sigma_\varphi = \sigma_\lambda = 4$ угл. сек и $\sigma_\xi = \sigma_\eta = \sigma_\zeta = 120$ м на истинные значения координат объекта φ, λ и ξ, η, ζ соответственно. По полученным измерениям и исходным данным по формулам (5) и (10) определялись истинные навигационные параметры объекта – широта φ и координата η соответственно, после чего рассчитывались долгота λ по формуле (2) и координаты ξ, ζ по соотношениям (6). Одновременно расчет истинных φ и η производился путем решения соответствующих нелинейных уравнений (3) и (8) модифицированным методом Ньютона – расхождение с линеаризованными

результатами оказалось в пределах вычислительных погрешностей. По результатам 250 испытаний (для каждой контрольной точки) средняя погрешность определения истинных координат объекта не превысила:

0,1 угл. сек – для φ, λ ;

2,8 м – для ξ, η, ζ ,

что с учетом величины с.к.о. (среднее квадратическое отклонение) помех измерений свидетельствует о возможности эффективного использования предложенного подхода.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 1.11772.2018/11.12.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kifana B.D., Abdurohman M. Great Circle Distance Methode for Improving Operational Control System Based on GPS Tracking System // International Journal on Computer Science and Engineering. – 2012. – V. 4, No. 4. – P. 647-662.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.
3. Каршаков Е.В. Особенности алгоритмов управления летательным аппаратом при аэросъемке // Проблемы управления. – 2012. – Вып. 3. – С. 71-76.
4. Сухомлинов Д.В., Патрикеев А.П., Малышкин К.В. Современные методы реализации геоинформационных задач на борту летательных аппаратов // Наука и транспорт. Гражданская авиация. – 2012. – № 1. – С. 16-17.
5. Соколов С.В. Аналитические модели пространственных траекторий для решения задач навигации // Прикладная математика и механика. – 2015. – Т. 79, вып. 1. – С. 24-30.
6. Chen C.L., Liu P.F., Gong W.T. A Simple Approach to Great Circle Sailing: The COFI Method // The Journal of Navigation. – 2014. – No. 67. – P. 403-418. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000751>.
7. Chen C.L. A systematic approach for solving the great circle track problems based on vector algebra // Polish Maritime Research. – 2016. – V. 23, No. 2. – P. 3-13.
8. Щербань И.В., Щербань О.Г., Конев Д.С. Метод слабосвязанной интеграции спутниковой и микроэлектромеханической инерциальной навигационных систем транспортного средства // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 133-139.
9. Tseng W.K., Lee H.S. The vector function for distance travelled in great circle navigation // The Journal of Navigation. – 2007. – V. 60, No. 1. – P. 164-170.
10. Nastro V., Tancredi U. Great Circle Navigation with Vectorial Methods // The Journal of Navigation. – 2010. – V. 63, No. 3. – P. 557-563.

11. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. – М. : Наука, 1966. – 580 с.
12. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М. : Наука, 1976. – 672 с.
13. Соколов С.В. Синтез аналитических моделей пространственных траекторий и их применение для решения задач спутниковой навигации // Прикладная физика и математика. – 2013. – Т. 1, вып. 2. – С. 3-12.

REFERENCES

1. Kifana B.D., Abdurrohman M. Great Circle Distance Methode for Improving Operational Control System Based on GPS Tracking System // International Journal on Computer Science and Engineering. 2012. V. 4, No. 4. P. 647-662.
2. GLONASS. Principles of construction and operation / Eds. A.I. Perova, V.N. Kharisova. M. : Radiotekhnika, 2010. 800 p.
3. Karshakov E.V. Features of algorithms for controlling an aircraft in aerial photography // Control Sciences. 2012. No. 3. P. 71-76.
4. Sukhomlinov D.V., Patrikeev A.P., Malynkin K.V. Modern methods of implementing geoinformation tasks on board aircraft // Science and Transport. Civil aviation. 2012. No. 1. P. 16-17.
5. Sokolov S.V. Analytical models of spatial trajectories for solving navigation problems // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2015. V. 79,

- Issue 1. P. 17-22. <https://doi.org/10.1016/j.jappmath-mech.2015.04.013>.
6. Chen C.L., Liu P.F., Gong W.T. A Simple Approach to Great Circle Sailing: The COFI Method // The Journal of Navigation. 2014. No. 67. P. 403-418. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000751>.
7. Chen C.L. A systematic approach for solving the great circle track problems based on vector algebra // Polish Maritime Research. 2016. V. 23, No. 2. P. 3-13.
8. Shcherban I.V., Shcherban O.G., Konev D.S. The Loosely Coupled Integration Method for the Satellite and Microelectromechanical Strapdown Inertial Navigation Systems of the Automotive Vehicle // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2015. V. 16, No. 2. P. 133-139.
9. Tseng W.K., Lee H.S. The vector function for distance travelled in great circle navigation // The Journal of Navigation. 2007. V. 60, No. 1. P. 164-170.
10. Nastro V., Tancredi U. Great Circle Navigation with Vectorial Methods // The Journal of Navigation. 2010. V. 63, No. 3. P. 557-563.
11. Andreev V.D. Theory of inertial navigation. Autonomous systems. Moscow : Nauka, 1966. 580 p.
12. Ishlinskiy A.Yu. Orientation, gyroscopes and inertial navigation. Moscow : Nauka, 1976. 672 p.
13. Sokolov S.V. Synthesis of analytical models of spatial trajectories and their application for solving satellite navigation problems // Applied Physics and Mathematics. 2013. V. 1, Issue 2. P. 3-12.

Информация об авторах

Information about authors

Соколов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, кафедры «Автоматика и телемеханика на ж.-д. транспорте» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС). Россия, 344038, г. Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, РГУПС. E-mail: s.v.s.888@yandex.ru.

Розенберг Игорь Наумович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геодезия, геоинформатика и навигация» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)). Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ), Институт пути, строительства и сооружений. E-mail: rozgeo@yandex.ru.

Баяндурова Александра Александровна, аспирант, старший преподаватель кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)). Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ), Институт пути, строительства и сооружений. E-mail: alexandra.bayandurova@mail.ru.

Духина Наталья Александровна, аспирант кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)). Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ), Институт пути, строительства и сооружений. E-mail: duhin.s@yandex.ru.

Sokolov Sergey Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department «Automation and telemechanics on railway transport» of the Federal state budgetary educational institution of higher education «Rostov state university of railway transport» (FGBOU VORGUPS). RGUPS, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia. E-mail: s.v.s.888@yandex.ru.

Rosenberg Igor Naumovich, Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department «Geodesy, geoinformatics and navigation» of the Federal state autonomous educational institution of higher education «Russian University of transport» (RUT (MIIT)). 9b9, Obrazcova Ulitsa, Moscow, 127994, Russia, RUT (MIIT), Institute of roads, construction and structures. E-mail: rozgeo@yandex.ru.

Bayandurova Alexandra Alexandrovna, graduate, senior lecturer of the Department of Geodesy, geoinformatics and navigation of the Federal state autonomous educational institution of higher education «Russian University of transport» (RUT (MIIT)). 9b9, Obrazcova Ulitsa, Moscow, 127994, Russia, RUT (MIIT), Institute of roads, construction and structures. E-mail: alexandra.bayandurova@mail.ru.

Dukhina Natalia Aleksandrovna, graduate of the Department of Geodesy, geoinformatics and navigation of the Federal state autonomous educational institution of higher education «Russian University of transport» (RUT (MIIT)). 9b9, Obrazcova Ulitsa, Moscow, 127994, Russia, RUT (MIIT), Institute of roads, construction and structures. E-mail: duhin.s@yandex.ru.