

А.С. Инчин^{1*}, Ю.Р. Шпади^{1,2}, А.Ю. Лозбин¹,
Б.К.Алиева¹, М.Ю. Шпади¹, Г.М. Аязбаев¹,
Р.Ж. Быкаев¹, Г.Ю. Ущиповская¹

¹ ТОО «Институт космической техники и технологий», г. Алматы, Казахстан

² РГП на ПХВ «Институт математики и математического моделирования», г. Алматы, Казахстан

*e-mail: inchin@mail.ru

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА КОРРЕКТИРОВКИ ВЕКТОРНЫХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ МАГНИТНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Статья посвящена разработке алгоритма корректировки векторных магнитных измерений, проведенных магнитометром вручную или с помощью беспилотных летательных аппаратов. Этот алгоритм и его программная реализация необходима в задаче навигации по магнитным данным. Идея магнитного позиционирования состоит в построении карты магнитного поля в выбранном регионе по данным измерений, а для этого все измерения должны быть скорректированы с учетом модельных данных. Ошибки измерений возникают из-за разного рода помех, связанных с неправильной ориентацией осей магнитометра. В качестве эталона берется модельное магнитное поле Земли, рассчитанное по известным моделям IGRF или WMM. Алгоритм основан на поиске углов ориентации в матрице перехода, обеспечивающей минимизацию расхождений между измеренными и модельными полями. Для минимизации функционала в программе использован метод конфигураций. Программа позволяет найти углы ориентации (крен, тангаж, рыскание), обеспечивающие минимум функционала. При этом заложена возможность выбора вариантов перемножения матриц, поскольку их произведение не является коммутативным. Алгоритм и программа будут полезны исследователям, связанным с магнитными полевыми измерениями и их практическому использованию. Также эти инструменты являются обязательными в задаче магнитного позиционирования.

Ключевые слова: ориентация и навигация летательных аппаратов, магнитное поле Земли, магнитное позиционирование, преобразование систем координат, программа.

A.S. Inchin^{1*}, Yu.R. Shpadi^{1,2}, A.Yu. Lozbin¹, B.K. Alieva
M.Yu. Shpadi¹, G.M. Ayazbayev¹, R.Zh. Bykaev¹, G.Yu. Uschipovskaya¹

¹Institute of Space Techniques and Technologies, Almaty, Kazakhstan

²Institute of mathematics and mathematical simulation, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: inchin@mail.ru

Algorithm and software for vector magnetic measurements correcting in magnetic positioning problem

The article is devoted to the development of an algorithm for correcting of vector magnetic data measured by a magnetometer manually or using unmanned aerial vehicles. This algorithm and its software realization is necessary in the problem of navigating by magnetic data. The idea of magnetic positioning is to create a map of the magnetic field in the selected region from the measurement data, and for this all measurements must be corrected taking into account the model data. Measurement errors occur due to various kinds of interference associated with the incorrect orientation of the magnetometer axes. The model magnetic field of the Earth, calculated from known models IGRF or WMM, is taken as a reference. The algorithm is based on the search for orientation angles in the transfer matrix, which ensures minimization of difference between measured and model fields. To minimize functionality, the Software uses the configuration method. The software can find orientation angles (roll, pitch, yaw) that provide a minimum of functionality. At the same time, the possibility of choosing options for multiplying matrices is inherent, since their product is not commutative. The algorithm and software will be useful to researchers related to magnetic field measurements and their practical using. Also, these tools are mandatory in the magnetic positioning task.

Key words: orientation and navigation of aircraft, Earth magnetic field, magnetic positioning, transformation of coordinate systems, program.

А.С. Инчин^{1*}, Ю.Р. Шпади^{1,2}, А.Ю. Лозбин¹, Б.К. Алиева¹
 М.Ю. Шпади¹, Г.М. Аязбаев¹, Р.Ж. Быкаев¹, Г.Ю. Ущиповская¹

¹«Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС (ҒТТИ), Алматы қ., Қазақстан

²Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: inchinas@mail.ru

Магниттік позицияландыру есебінде векторлық магниттік өлшеулерді түзету алгоритмі мен бағдарламасы

Мақала қолмен атқарылатын немесе ұшқышсыз ұшу аппараттарының көмегімен магнитометрмен жүргізілген векторлық магниттік өлшемдерді түзету алгоритмін әзірлеуге арналған. Бұл алгоритм және оның бағдарламалық жасақтамасы магниттік деректер бойынша навигация есептерінде қажет. Магниттік позицияландыру (орнын анықтау) идеясы өлшем деректері бойынша таңдалған аймақта магниттік өріс картасын құрудан тұрады, ал ол үшін барлық өлшемдер модельдік деректерді есепке алумен түзетілуі тиіс. Өлшеу қателері магнитометр осьтерінің дұрыс бағытталмауына байланысты әртүрлі кедергілерден туындайды. Эталон ретінде IGRF немесе WMM белгілі үлгілері бойынша есептелген Жердің модельдік магниттік өрісі алынады. Алгоритм өлшенген және модельдік өрістер арасындағы алшақтықтарды барынша азайтуды қамтамасыз ететін өту матрицасында бағдарлау бұрыштарын іздеуге негізделген. Бағдарламада функционалды азайту үшін конфигурация әдісі пайдаланылды. Бағдарлама функционалдың ең төменгі мөлшерін (минимумын) қамтамасыз ететін бағдарлау бұрыштарын (қисаю, тангаж, жорту) табуға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда матрицаларды көбейтудің нұсқаларын таңдау мүмкіндігі бар, өйткені олардың көбейтіндісі коммутативті болып табылмайды. Алгоритм мен бағдарлама магниттік өрісті өлшеуге және оларды практикалық қолдануға байланысты зерттеушілерге пайдалы болады. Сонымен қатар, бұл құралдар магниттік позициялау мәселесінде міндетті болып табылады.

Түйін сөздер: ұшу аппараттарын бағдарлау және навигациялау, Жердің магниттік өрісі, магниттік позицияландыру, координаттар жүйесін өзгерту, бағдарлама.

Введение

В отсутствие навигационных приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (GPS/ГЛОНАСС и др.) или при сбоях в работе такого оборудования необходимо определить местоположение объекта альтернативными способами. Задача альтернативного позиционирования стала актуальной в связи с развитием средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), когда электронными способами вносятся помехи в сигналы ГНСС. Одним из способов альтернативного позиционирования может стать позиционирование по данным измерений магнитного поля Земли (МПЗ). Измерение параметров магнитного поля Земли в выбранном регионе осуществляется типовыми или специализированными магнитометрами. При этом измеряется полный вектор МПЗ – значения его компонент B_x , B_y , B_z его модуль $mod B$. Проведенные исследования [1-7] показали, что магнитное позиционирование позволяет обеспечить точность определения местоположения с точностью до 10 м, что соизмеримо с точностью позиционирования с помощью ГНСС. Для того, чтобы начать работать с такой технологией, необходимо сначала построить карту магнитного поля региона по данным измерений.

Затем, проведя измерения поля в точке в пределах выбранного региона, осуществить поиск на карте точки, наиболее близкой по значениям поля к измеренной. Ее координаты и будут искомой точкой местоположения.

Однако в этой задаче есть тонкости, связанные с технологией измерения МПЗ. При векторных измерениях МПЗ необходимо строго соблюдать ориентацию магнитометра. Это несложно сделать при тщательных ручных измерениях поля. Но ручные измерения весьма трудоемки и длительны. Поэтому в реальных задачах на больших площадях используют автоматизированные средства измерений с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Но при таких автоматизированных измерениях на борту БПЛА бывает сложно сохранить нужную ориентацию бортового магнитометра в силу наличия различных внешних факторов, таких как направление и сила ветра, которые влияют на запланированный маршрут проведения магнитной съемки, на ориентацию магнитометра и соответственно вносят погрешности в проводимые измерения. Это требует корректировки проведенных векторных измерений и внесение поправок на ориентацию платформы магнитометра.

Методы исследования

При измерении магнитного поля Земли обычно используются 2 системы координат – модельная (для спутников ее называют орбитальной) и связанная система координат, привязанная к конкретному оборудованию – платформе, на которой установлены измерительные приборы (в нашем случае магнитометр).

В модельной прямоугольной системе координат подразумеваются идеальные измерения компонент магнитного поля, а именно – ось X направлена на северный географический полюс (не магнитный), ось Z – направлена в зенит от центра Земли., а ось Y дополняет систему до правой. В связанной системе координат как правило ось X направлена по ходу движения платформы, ось Z – направлена вверх по направлению от Земли (от ее центра), ось Y дополняет систему до правой. В идеальном случае измерений эти две системы совпадают. Но в реальных условиях эти системы координат могут существенно отличаться в силу различных условий, например, направление ветра, конструкционные издержки – неточная установка магнитометра на платформе, колебания движущейся платформы за счет электродвигателей и пр. Эти причины, конечно, влияют на векторные измерения – они оказываются искаженными. Возникает необходимость корректировки векторных магнитных измерений. При этом эталоном служит модельное магнитное поле Земли, рассчитанное, например, по модели IGRF [8].

Результаты и обсуждение

Оценка ориентации объектов по магнитному полю основана на анализе расхождений модельных V_{mod} и измеренных $V_{изм}$ компонент МПЗ [9]. Ориентация объекта определяется тремя углами, которые называют корабельными

– креном θ , тангажем ψ и рысканием ϕ , которые связаны с коэффициентами матрицы перехода от измеренных значения поля к модельным [10].

$$V_{mod} = A \cdot V_{изм}; \quad (1)$$

где:

A – матрица перехода от измеренных компонент поля к модельным.

При этом используются следующие определения углов ориентации – крен – вращение относительно оси X , тангаж – вращение относительно оси Y , рыскание – вращение относительно оси Z .

Для восстановления истинных значений компонент вектора магнитного и электрического поля необходимо найти матрицу поворотов $A(\theta, \psi, \phi)$, обеспечивающую преобразование систем координат.

Поворот одной жесткой системы координат относительно другой представляется как последовательность трех поворотов относительно осей системы $A(\theta, \psi, \phi) = A1(\theta)A2(\psi)A3(\phi)$. При этом матрица $A1$ (2):

$$A1(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

задает поворот системы относительно оси OX .

Матрица $A2$ (3):

$$A2(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (3)$$

поворачивает систему относительно оси OY , и матрица $A3$ (4):

$$A3(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

поворачивает систему относительно оси OZ .

Тогда, итоговая матрица примет вид (5):

$$A(\theta, \psi, \phi) = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \phi & -\cos \psi \sin \phi & \sin \psi \\ \cos \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi - \sin \theta \sin \psi \sin \phi & -\sin \theta \cos \psi \\ \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{pmatrix} \quad (5)$$

Заметим, что задача имеет неоднозначное решение в силу не коммутативности матриц,

поскольку матрицу перехода можно получить различными 6-ю комбинациями перемножения матриц A_1, A_2, A_3 . А именно:

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3, A_1 \cdot A_3 \cdot A_2, A_3 \cdot A_1 \cdot A_2, \\ A_3 \cdot A_2 \cdot A_1, A_2 \cdot A_1 \cdot A_3, \quad (6)$$

В программе, реализующей алгоритм, заложена возможность выбора любой из представленных комбинаций.

Для того, чтобы найти компоненты вектора в орбитальной системе координат, необходимо матрицу поворота умножить на компоненты вектора в спутниковой системе координат (7):

$$\begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} = A(\theta, \psi, \phi) \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

Таким образом, чтобы скорректировать вектор измеренных значений, необходимо умножить на него матрицу перехода A , которая зависит в свою очередь от углов ориентации.

Для определения углов ориентации по двум векторам – модельному и измеренному используется следующий алгоритм.

Минимизируется функционал, зависящий от трех переменных (а именно углов ориентации).

$$(B_{mod} - A \cdot B_{изм}) \rightarrow \min(\theta, \psi, \phi);$$

Для поиска минимума этой функции используется алгоритм минимизации функции многих переменных методом прямого поиска – алгоритм Агеева № 178б [11]. Для реализации предложенного алгоритма разработана программа, входные данные и результаты работы которой приведены ниже.

Таблица 1 – Входные данные к программе формируются в виде файла (Пример файла)

время	долг	шир	выс	BizmX	BizmY	BizmZ	BmodX	BmodY	BmodZ
01012023000000000	75	43	800	23771.9	2084.4	50434.7	30839.65669	4145.379115	46312.39925
01012023000000001	75.1	43.1	800	23776.2	2075.3	50450	30848.72336	4136.516607	46325.61445
01012023000000002	75.2	43.2	800	23780.6	2066.1	50465.2	30857.89328	4127.594094	46338.70419
01012023000000003	75.3	43.3	800	23784.9	2056.8	50480.4	30866.99356	4118.548502	46351.79549
01012023000000004	75.4	43.4	800	23789.2	2047.5	50495.6	30876.09384	4109.502911	46364.88679

Здесь дата/время задается в формате день, месяц, год, час, мин, сек, мсек – ддммггггччммссммм.

Долг (долгота), шир (широта) задаются в градусах и долях градуса, выс (высота над уровнем моря) в метрах.

Интерфейс программы и выходные результаты выдаются в виде, показанном на рисунках 1 и 2.

Здесь кроме входных данных выдаются $|B_{изм}|$, $|B_{mod}|$ модули (длины) измеренных и модельных векторов, их разности $|B_{изм}| - |B_{mod}|$, углы ориентации – крен, тангаж, рыскание, угол между измеренными и модельными векторами в градусах и долях градусов, а также количество шагов проведенного поиска и итоговое значение минимизируемой функции.

#	Время	Долгота	Широта	Высота	BizmX	BizmY	BizmZ	Bizm	BmodX	BmodY	BmodZ	Bmod
1	1,01202E+15	75	43	800	23771,9	2084,4	50434,7	55 795,223067	30839,65669	4145,379115	46312,39925	55 795,223067
2	1,01202E+15	75,1	43,1	800	23776,2	2075,3	50450	55 810,546105	30848,72336	4136,516607	46325,61445	55 810,546107
3	1,01202E+15	75,2	43,2	800	23780,6	2066,1	50465,2	55 825,819444	30857,89328	4127,594094	46338,70419	55 825,819445
4	1,01202E+15	75,3	43,3	800	23784,9	2056,8	50480,4	55 841,048328	30866,99356	4118,548502	46351,79549	55 841,048328
5	1,01202E+15	75,4	43,4	800	23789,2	2047,5	50495,6	55 856,279076	30876,09384	4109,502911	46364,88679	55 856,279074
6	1,01202E+15	75,5	43,5	800	23793,6	2038,2	50510,7	55 871,463867	30885,27188	4100,493148	46377,86553	55 871,463864
7	1,01202E+15	75,6	43,6	800	23797,9	2028,8	50525,8	55 886,604294	30894,38029	4091,360306	46390,84583	55 886,604294
8	1,01202E+15	75,7	43,7	800	23802,2	2019,4	50540,8	55 901,656199	30903,47133	4082,236048	46403,72802	55 901,656197
9	1,01202E+15	75,8	43,8	800	23806,6	2009,9	50555,9	55 916,839381	30912,70035	4073,034618	46416,68097	55 916,839380
10	1,01202E+15	75,9	43,9	800	23810,9	2000,4	50570,8	55 931,801076	30921,79952	4063,823109	46429,45216	55 931,801077

Рисунок 1 – Интерфейс программы и пример результатов расчетов

BcorX	BcorY	BcorZ	Bmod - Bizm	Крен	Тангаж	Рыскание	Угол Bmod/Bizm	eval	spsi
30839,656369	4145,37962	46312,399418	0,000000	6,514312	10,589016	18,116181	8,672865	240	0,000622
30848,723427	4136,515871	46325,614469	0,000002	6,514610	10,588461	18,116811	8,675698	229	0,000739
30857,893439	4127,594753	46338,704025	0,000001	6,514857	10,587876	18,117315	8,678564	209	0,000698
30866,99573	4118,549561	46351,793951	-0,000001	6,515155	10,587309	18,117934	8,681454	246	0,002863
30876,093377	4109,502118	46364,887171	-0,000002	6,515441	10,586730	18,118524	8,684343	284	0,000994
30885,27048	4100,491674	46377,866597	-0,000004	6,515751	10,586163	18,119143	8,687234	291	0,002296
30894,380198	4091,361198	46390,845813	0,000000	6,513688	10,584605	18,114857	8,690150	298	0,000896
30903,471363	4082,235372	46403,72806	-0,000003	6,513980	10,584026	18,115442	8,693065	297	0,000678
30912,701112	4073,034961	46416,680435	-0,000002	6,514272	10,583441	18,116020	8,696011	246	0,000992
30921,797808	4063,822248	46429,453374	0,000001	6,514616	10,582874	18,116702	8,698952	228	0,002268
30896,470724	4162,115886	46226,64664	0,000003	6,518988	10,589607	18,109832	8,678339	262	0,001479

Рисунок 2 – Пример результатов расчетов (продолжение)

Также во вкладке «График» заложена возможность выдачи графиков углов ориентации и значений магнитного поля (модельных и измеренных) с возможностью их сохранения в буфер обмена.

Заключение

Целью исследования данной статьи являлось описание разработанного алгоритма корректировки векторных магнитных измерений, основанной на минимизации функционала, связывающего матрицей перехода измеренные и модельные значения параметров магнитного поля Земли. Для минимизации функционала в программе использован метод конфигураций. Программа позволяет найти углы ориентации (крен, тангаж, рыскание), обеспечивающие

минимум функционала. При этом заложена возможность выбора вариантов перемножения матриц, поскольку их произведение не является коммутативным. Алгоритм и программа будут полезны исследователям, связанным с магнитными полевыми измерениями и их практическому использованию. Также эти инструменты являются обязательными в задаче магнитного позиционирования.

Благодарность, конфликт интересов

Статья выполнена в рамках проекта грантового финансирования на 2022-2024 гг. ИРН AP148043/0222: «Разработка системы позиционирования наземных объектов по данным магнитного поля Земли с использованием технологии BigData».

Литература

1. Bill Schweber. Навигация по магнитному полю как «альтернатива» GPS? (Magnetic-Field Navigation as an «Alternative» GPS?); 23.12.2020г. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=633999> (accessed 27.02.2024);
2. Albert R. Gnad, Joseph Belarge etc. Signal Enhancement for Magnetic Navigation Challenge Problem.- arXiv:2007.12158 [cs.LG],-URL: <https://arxiv.org/abs/2007.12158> (accessed 27.02.2024);
3. И.М. Голев, А.В. Сергеев. Локальная система навигации с использованием низкочастотного магнитного поля.- Вестник Воронежского государственного технического университета.- Т. 15. № 5. (2019), с.88-94;
4. Kyle Mizokami. The Air Force May Ditch GPS for Earth's Magnetic Field.- Popular mechanics, 05.08.2020.- URL: <https://news.yahoo.com/air-force-may-ditch-gps-221000982.html> (accessed 27.02.2024);
5. Finlay, C.C., Maus, etc. "International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation". Publications, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce, 2010, 261 p.
6. Chulliat, A., W. Brown, P. Alken, S. Macmillan, M. Nair, C. Beggan, A. Woods, B. Hamilton, B. Meyer and R. Redmon, 2019, Out-of-Cycle Update of the US/UK World Magnetic Model for 2015-2020: Technical Note, National Centers for Environmental Information, NOAA. doi: 10.25921/xhr3-0t19
7. Ахмедов Д.Ш., Инчин А.С., Лозбин А.Ю., Аязбаев Г.М. О возможности позиционирования объекта по данным магнитного поля Земли. Мультидисциплинарный научный журнал «Архивариус» сборник научных публикаций XXXIV Международная научно-практическая конференция «Наука в современном мире» (20 июня 2019г.). Киев, 2019, с. 68-75
8. International Geomagnetic Reference Field.- <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html> (accessed 27.02.2024);
9. Прохоров М., Захаров А. Ориентация и навигация в космосе – новые методы и перспективы // Физика космоса: труды. – 2011. – С. 170-195.
- 10.Корабельная система координат Крылова А.Н. URL: <https://vunivere.ru/work59693?screenshots=1> (accessed 27.02.2024);
11. М.И. Агеев, В.П.Алик, Ю.И.Марков. Библиотека алгоритмов 1516-2006. Справочное пособие.- М.: Радио и связь, 1981. – 184 с. ил.

Авторлар туралы мәлімет:

Инчин Александр Сергеевич (корреспонденттік автор) – Ғылыми мақсаттағы ғарыш жүйелері зертханасының меңгерушісі; техника ғылымдарының кандидаты, доцент; «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС (Қазақстан, Алматы қ., E-mail: inchinas@mail.ru)

Шпади Юрий Рейнгольдович – Ғылыми мақсаттағы ғарыш жүйелері зертханасының жетекші ғылыми қызметкері; физика-математика ғылымдарының кандидаты; «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС (Қазақстан, Алматы, E-mail: yu-shpadi@yandex.ru)

Лозбин Анатолий Юрьевич – Ғылыми мақсаттағы ғарыштық жүйелер зертханасы меңгерушісінің орынбасары; «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС (Қазақстан, Алматы қ., E-mail: lozbin@mail.ru)

Алиева Бахытқұл Куттымұратовна – «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС Байқау кеңесінің хатшысы (Қазақстан, Алматы қ., E-mail: bahyt_ali@mail.ru)

Шпади Максим Юрьевич – Ғылыми мақсаттағы ғарыш жүйелері зертханасының аға ғылыми қызметкері; «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС (Қазақстан, Алматы қ., E-mail: mshpadi@mail.ru)

Аязбаев Ғалымжан Маратович – Ғылыми мақсаттағы ғарыш жүйелері зертханасының аға ғылыми қызметкері; «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС (Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, E-mail: galiman85@mail.ru)

Быкаев Рахым Женисович – Ғылыми мақсаттағы ғарыш жүйелері зертханасының аға ғылыми қызметкері; «Ғарыш техникасы және технологиялары институты» ЖШС (Қазақстан, Алматы қ., E-mail: rakhim.b@mail.ru)

Ущиповская Галина Юрьевна – «Ғарыш техникасы және технологиясы институты» ЖШС ғылыми мақсаттағы ғарыш жүйелері зертханасының технигі (Қазақстан, Алматы қ., E-mail: inchinas@mail.ru)

Сведения об авторах:

Инчин Александр Сергеевич (корреспондентный автор) – Заведующий лабораторией космических систем научного назначения; кандидат технических наук, доцент; ДТОО «Институт космической техники и технологии» (Казахстан, г.Алматы, E-mail: inchinas@mail.ru)

Шпади Юрий Рейнгольдович – Ведущий научный сотрудник лаборатории космических систем научного назначения; кандидат физико-математических наук; ДТОО «Институт космической техники и технологии», (Казахстан, Алматы, E-mail: yu-shpadi@yandex.ru)

Лозбин Анатолий Юрьевич – Заместитель заведующего лабораторией космических систем научного назначения; ДТОО «Институт космической техники и технологии» (Казахстан, г.Алматы, E-mail: lozbin@mail.ru)

Алиева Бахытқұл Куттымұратовна – секретарь Наблюдательного совета ДТОО «Институт космической техники и технологии» (Казахстан, г.Алматы, E-mail: bahyt_ali@mail.ru)

Шпади Максим Юрьевич – Старший научный сотрудник лаборатории космических систем научного назначения; ДТОО «Институт космической техники и технологии», (Казахстан, г.Алматы, E-mail: mshpadi@mail.ru)

Аязбаев Ғалымжан Маратович – Старший научный сотрудник лаборатории космических систем научного назначения; ДТОО «Институт космической техники и технологии» (Республика Казахстан, г.Алматы, E-mail: galiman85@mail.ru)

Быкаев Рахим Женисович – Старший научный сотрудник лаборатории космических систем научного назначения; ДТОО «Институт космической техники и технологии», (Казахстан, г.Алматы, E-mail: rakhim.b@mail.ru)

Усиповская Галина Юрьевна – Техник лаборатории космических систем научного назначения ДТОО «Институт космической техники и технологии» (Казахстан, г.Алматы, E-mail: inchinas@mail.ru)

Information about authors:

Alexander Inchin (corresponding author) – Head of the Scientific Space Systems Laboratory; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Institute of Space Techniques and Technology (Kazakhstan, Almaty, E-mail: inchinas@mail.ru)

Yuri Shpadi – Leading researcher of the Scientific Space Systems Laboratory; Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Institute of Space Techniques and Technology and Technology, (Kazakhstan, Almaty, E-mail: yu-shpadi@yandex.ru)

Anatoliy Lozbin – Deputy Head of the Scientific Space Systems Laboratory; Institute of Space Techniques and Technology (Kazakhstan, Almaty, E-mail: lozbin@mail.ru)

Bakhytkul Aliyeva – Secretary of the Supervisory Board of the Institute of Space Techniques and Technology (Kazakhstan, Almaty, E-mail: bahyt_ali@mail.ru)

Maxim Shpadi – Senior Researcher of the Scientific Space Systems Laboratory of the Institute of Space Techniques and Technology" (Kazakhstan, Almaty, E-mail: mshpadi@mail.ru)

Galymzhan Ayazbaev – Senior Researcher of the Scientific Space Systems Laboratory; Institute of Space Techniques and Technology (Almaty, Republic of Kazakhstan, E-mail: galiman85@mail.ru)

Rakhim Bykaev – Senior Researcher of the Scientific Space Systems Laboratory of the Institute of Space Techniques and Technology (Kazakhstan, Almaty, E-mail: rakhim.b@mail.ru)

Galina Uschipoyskaya – The Technician of the Scientific Space Systems Laboratory of the Institute of Space Techniques and Technology (Kazakhstan, Almaty, E-mail: inchinas@mail.ru)

Поступила 1 марта 2024

Принята 8 июня 2024