

Определение координат источников радиоизлучений для системы спутникового радиомониторинга на базе малого космического аппарата

¹*КУЛАКАЕВА Айгуль Ергалиевна, PhD, ассистент-профессор, aigul_k.pochta@mail.ru,

¹ДАЙНЕКО Евгения Александровна, PhD, ассоциированный профессор, y.daineko@edu.iitu.kz,

¹АЙТМАГАМБЕТОВ Алтай Зуфарович, к.т.н., профессор, a.aitmagambetov@iitu.edu.kz,

¹ОНГЕНБАЕВА Жадыра Жумабековна, магистр, сениор-лектор, zh.ongenbayeva@iitu.edu.kz

¹Международный университет информационных технологий, Казахстан, Алматы, ул. Манаса, 34/1,

*автор-корреспондент.

Аннотация. На сегодняшний день в рамках существующих наземных средств радиомониторинга невозможно качественно выполнить функции и задачи радиоконтроля. Для стран с большой территорией, как Республика Казахстан, для повышения эффективности системы радиомониторинга использования радиочастотного спектра целесообразно использовать низкоорбитальные малые космические аппараты в качестве станций радиоконтроля. В работе рассмотрен разработанный метод определения координат источника радиоизлучения на основе угломерного метода. Предложены алгоритмы и составлена компьютерная программа для определения местоположения источника радиоизлучения. Разработанный метод может быть использован на начальных этапах разработки системы радиомониторинга на базе одного малого космического аппарата.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, радиомониторинг, определение координат, низкоорбитальный спутник, малый космический аппарат, радиочастотный спектр.

Введение

В настоящее время задача повышения эффективности систем радиомониторинга не теряет своей актуальности. Основным назначением систем радиомониторинга является периодический или постоянный контроль использования радиочастотного спектра (РЧС) [1]. В Республике Казахстан эти функции осуществляются службой радиомониторинга только на базе наземных систем радиоконтроля [2]. Наземные системы имеют ряд недостатков, например, ограниченная зона радиомониторинга, недостаточное количество радиоконтрольных пунктов по всей территории страны (общая площадь страны 2724,9 тыс. км), трудоемкость проведения процедур радиоконтроля в сложных климатических условиях и в условиях сложного рельефа местности. Также следует отметить недостаточную автоматизацию процессов радиомониторинга.

Выполнение функций радиомониторинга с помощью наземных средств радиоконтроля на больших территориях со сложным рельефом усложняют эту процедуру. В связи с этим для стран с большими территориями наиболее перспективными являются системы радиомониторинга на базе спутниковых систем. Такие системы обладают рядом преимуществ: высокая оперативность,

глобальный обзор и полный охват территории.

Для определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) известны методы, основанные на уровне принимаемого сигнала (RSS – received signal strength), фазе несущего сигнала (POA – carrier phase of arrival), разнице времени прихода (TDOA – time difference of arrival), угле прихода (AOA – angle of arrival или направлении прихода DOA – direction of arrival), разнице частоты прихода (FDOA – frequency difference of arrival), доплеровской разнице частот (doppler difference – DD), и комбинированные методы, состоящие из двух или более вышеперечисленных методов [3, 4]. На сегодняшний день в спутниковых системах наибольшее распространение получили методы TDOA и FDOA [5, 6]. Однако такие способы требуют несколько спутников, что является неэффективным с экономической точки зрения. Поэтому реализация функций радиомониторинга на базе одного низкоорбитального спутника является актуальной проблемой.

При создании системы радиомониторинга с применением малого космического аппарата (МКА) необходимо иметь данные уровней сигналов на входе бортового измерительного приемника от различных наземных ИРИ. В работе [7] проведен анализ бюджета радиолинии, который

показал возможность использования низкоорбитального МКА для радиомониторинга использования РЧС.

При решении задачи определения местоположения ИРИ необходимо выбрать метод определения координат. В работах [8, 9] рассмотрены и предложены методы определения координат источников радиоизлучений с применением низкоорбитальной группировки спутников. Однако на первом этапе создания системы радиомониторинга целесообразно рассмотреть применение одного МКА, что позволит упростить и удешевить систему радиомониторинга.

Методы исследования

Для определения координат (широты и долготы) ИРИ на базе одного МКА, который находится на круговой полярной орбите (наклонение орбиты $i=90^\circ$), предлагается рассмотреть метод, принцип которого поясняется на рисунке 1.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: O – центр масс Земли; D – местоположение ИРИ; B – местоположение МКА.

Определение широты места расположения ИРИ проводилось на основе анализа параметров треугольника AOB , построенного в эллипсе (сечение сфероида плоскостью ZOY). Точка A находится на поверхности на следе МКА в месте пересечения его с параллелью, на которой находится ИРИ (то есть на той же широте); сторона $OA=R_z$ (радиус Земли), зависящий от широты φ ; сторона $OB=R_o$ (радиус орбиты МКА); φ – широта ИРИ (угол между направлением OA и экваториальной плоскостью); α – широта МКА (угол между направлением OB и экваториальной плоскостью).

Углы в треугольнике AOB : $(\varphi - \alpha)$ – разность широт γ , он противолежит стороне AB ; β – угол

под которым с МКА видна точка A относительно направления OB , он противолежит сторонам OA ; k – 3-й угол в треугольнике, противолежит стороне OB . При известных 3 параметрах треугольника легко найти другие его параметры. В данном случае известна сторона OB и угол β (определяется при сканировании), остальные параметры зависят от φ , который требуется определить. Поэтому требуется применить метод итераций. Поскольку поверхность Земли отличается от сферической и имеет форму геоида, поверхность которого сложно выразить математически, при решении ряда практических задач взамен поверхности геоида принимают поверхность сфероида (эллипсоида вращения) – близкого по форме геоиду.

Область радиомониторинга (ОРМ) территории Республики Казахстан находится в диапазоне значений северной широты от $\varphi = 40^\circ$ до $\varphi = 56^\circ$ (среднее значение ОРМ $\varphi = 48^\circ$). Именно на средней широте выбираем высоту орбиты МКА h (в нашем случае $h = 650$ км). Для определения радиуса круговой орбиты R_o требуется вычислить радиус эллипсоида (линейное расстояние от центра масс Земли до поверхности), зависящий от широты. Для R_z ($\varphi = 48^\circ$) он составит 6366299 м.

Научные результаты

Для реализации данной системы необходимо на борту МКА иметь две антенны типа активной фазированной антенной решетки (АФАР). АФАР должны иметь определенный угол сканирования земной поверхности с целью обнаружения ИРИ [10].

1.1 Предлагаемый алгоритм определения широты места расположения ИРИ

Как видно из рисунка 1, если известна сторона OB и угол β (определяется при сканировании),

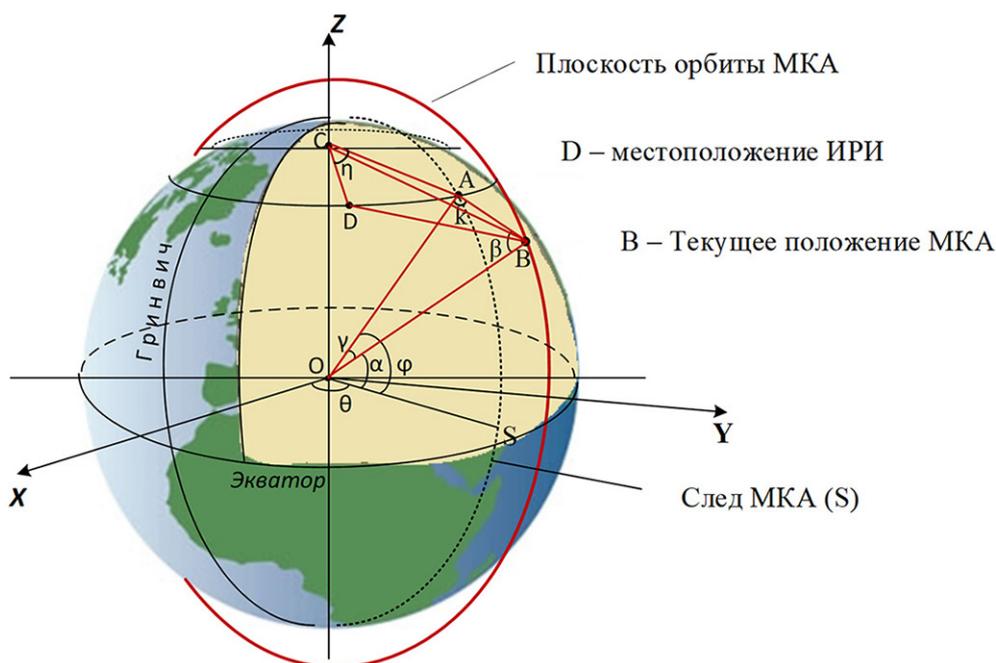


Рисунок 1 – Определение координат ИРИ на базе одного МКА

остальные параметры зависят от φ , который требуется определить. Так как известными являются только два параметра треугольника, то потребуются применить метод итераций. Необходимо получить также ответ на вопрос о том, какой диапазон широт точек расположения ИРИ «виден» с орбиты МКА. Для этого нужно решить систему уравнений:

- каноническое уравнение эллипса:

$$\frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где Y и Z – координаты эллипса, a – большая полуось, b – малая полуось.

- уравнение касательной к эллипсу из точки нахождения МКА:

$$\frac{Y_k Y_b}{a^2} + \frac{Z_k Z_b}{b^2} = 1. \quad (2)$$

Координаты МКА удобно выбрать на экваторе ($Y_b=7016299$ м; $Z_b=0$ м). Сначала при $Z_b=0$ м находим $Y_k = \frac{a^2}{Y_b}$, а затем находим Z_k :

$$Z_k = \sqrt{\left(1 - \frac{a^2}{Y_b^2}\right) * b^2}. \quad (3)$$

Координаты точки касания $Z_k=2648836$ м; $Y_k=5798016,7$ м.

Широта точки касания $\varphi_k = \arctg\left(\frac{Z_k}{Y_k}\right) = 24,55^\circ$.

Таким образом, с МКА на экваторе видны ИРИ в диапазоне широт от 0° до $24,55^\circ$, то есть за пределами территории Казахстана. При перемещении МКА на широту $\alpha=40^\circ$ примерно тот диапазон видимых широт мест расположения ИРИ сохраняется (от 40° до $64,55^\circ$).

Важен также ответ на вопрос, какой участок зависимости $\varphi(\beta)$ позволит уменьшить погрешность определения φ за счет неточности оценки β . Ответ можно получить при решении обратной задачи (по известным φ определяем β). Выполнить расчет можно по формуле (результаты расчета приведены в таблице 1):

$$\beta(\varphi) = \arcsin\left[R(\varphi) * \frac{\sin(\gamma)}{AB(\gamma)}\right]. \quad (4)$$

Из таблицы 1 видно, что предпочтение нужно отдать начальному участку зависимости $\beta(\varphi)$. Высокую точность позиционирования можно обеспечить с помощью GPS/ГЛОНАСС.

Рассмотрим возможные погрешности определения широты ИРИ. Погрешность $\Delta\varphi_0$ за счет неточной установки направления ДН антенны на центр масс Земли (точка O) $\Delta\beta_0$ (сюда же можно включить другие погрешности аппаратного характера) можно определить по формуле:

$$\Delta\varphi_0 = \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\beta}\right) * \Delta\beta_0. \quad (5)$$

В таблице 2 приведены средние значения зависимости $\Delta\varphi_0/\Delta\beta_0$ при исходных данных $\alpha=40^\circ$; $\Delta\varphi/\Delta\beta=0,1028^\circ$ (данные из таблицы 1).

Алгоритм для определения широты ИРИ приведен на рисунке 2.

Пересчитать погрешность в линейные размеры можно по формуле:

$$\Delta l_0 = \sqrt{\left[R_s^2(40,5) + R_s^2(40,5 + \Delta\varphi_0) - \left[-2 \cdot R_s(40,5 + \varphi_0) \cdot \cos \Delta\varphi_0\right]\right]}. \quad (6)$$

В заключение, на последнем примере оценим влияние на погрешность определения широты местоположения ИРИ высоты местности над уровнем моря (пусть $h_m = 1000$ м).

Тогда $R_s(41,6^\circ) + 1000 = 6369683$ м, новое значение $AB = 653318,427$ м, новое значение $\beta = 7,8238^\circ$, изменение $\Delta\beta = 0,013^\circ$ и погрешность $\Delta\varphi = 0,1024 \cdot 0,013 = 0,001^\circ$. В линейных размерах это примерно 111 м.

1.2 Предлагаемый алгоритм определения долготы местоположения ИРИ

После определения широты ИРИ φ (по методике, приведенной в подразделе 1.1) перейдем к определению долготы. Рассмотрим особенности определения долготы ИРИ на основе анализа параметров треугольников ABD , ACD , BCD , при-

Таблица 1 – Зависимость β от значения широты места расположения ИРИ φ при $\alpha = 40^\circ$

$\varphi, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$R_s(\varphi), \text{ м}$	$AB(\gamma), \text{ м}$	$\beta(\gamma), ^\circ$
40	0	6369274	647024,9	0
41	1	6368905	657822,6	9,72798
42	2	6368535	688504,6	18,8332
43	3	6368163	736578,7	26,9026
44	4	6367790	798894,6	33,7804

Таблица 2 – Зависимость $\Delta\varphi_0/\Delta\beta_0$

$\Delta\varphi_0, ^\circ$	0,1028	0,09252	0,08224	0,07196	0,06168	0,0514	0,04112	0,03084	0,02056	0,01028
$\Delta\beta_0, ^\circ$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

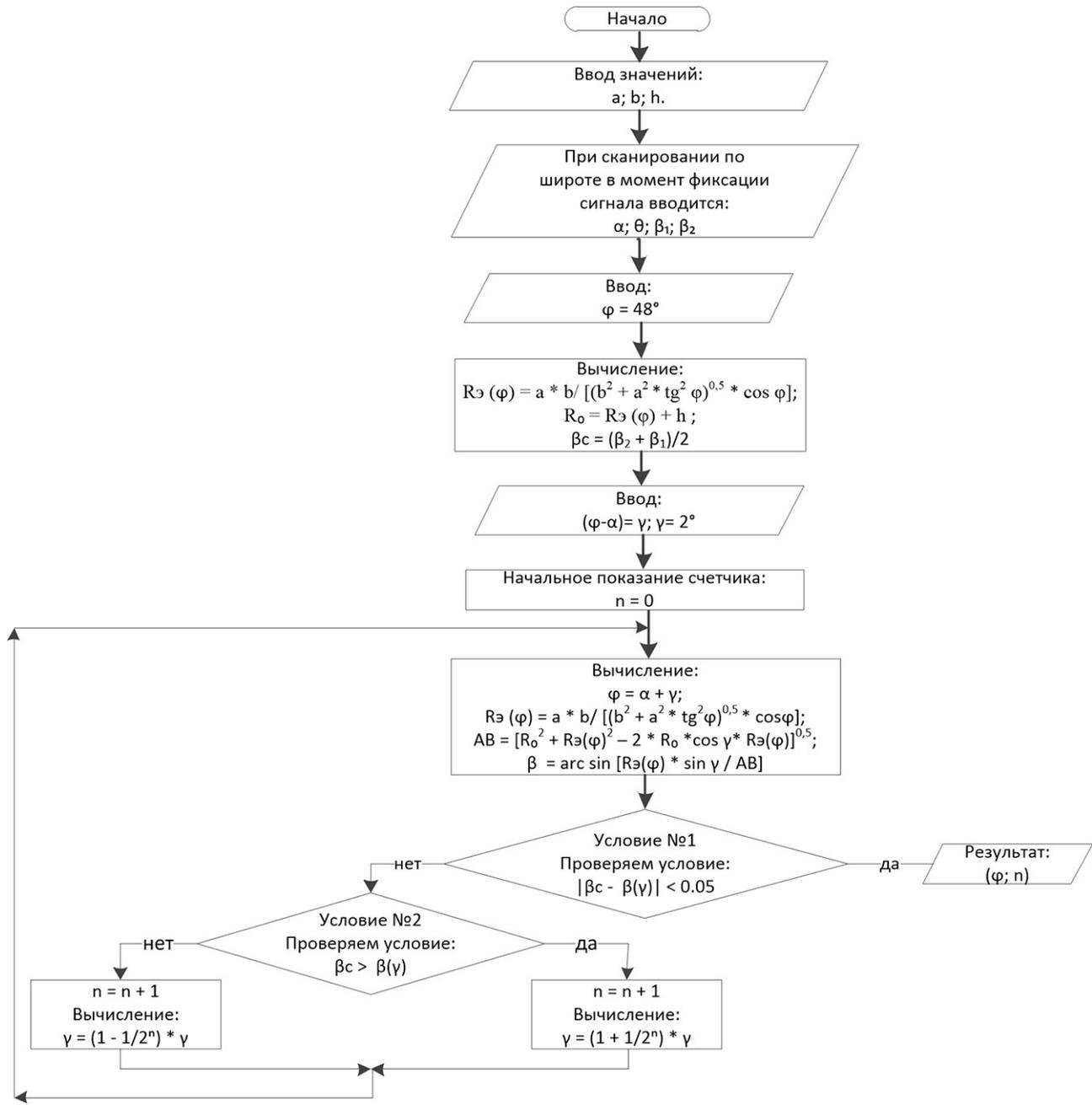


Рисунок 2 – Алгоритм определения широты ИРИ

веденных на рисунке 1. Сканирование лучом относительно точки *A* осуществляется вдоль параллели, соответствующей широте φ , в западном и восточном направлении. При появлении сигнала фиксируется направление на ИРИ с помощью угла μ (μ – угол между направлениями от МКА (точка *B*) на ИРИ (точка *D*) и на точку *A*), а также знак поправки на долготу η относительно долготы МКА (θ) – западное направление (–), восточное – (+). На рисунке 1 показано только западное местоположение ИРИ (точка *D*), аналогично точка *D* может быть под таким же углом μ в восточном направлении.

Точка *A* – точка пересечения рассмотренной выше параллели со следом орбиты МКА на земной поверхности. Точка *C* находится на оси *OZ* в

месте пересечения ее плоскостью по параллели, на которой находится ИРИ (то есть на той же широте). Данное сечение представляет собой окружность, на которой лежат точки *A* и *D*, а точка *C* – центр этой окружности. Радиус окружности $R = AC = DC = R_э(\varphi) \cdot \cos \varphi$.

Сторона *BC* – расстояние между МКА и точкой *C*, сторона *BD* – расстояние между МКА и ИРИ, сторона *BA* – расстояние между МКА и точкой *A*, сторона *AD* (хорда окружности), знание которой необходимо для определения поправки η . Для определения всех расстояний необходимы координаты точек *A*, *B*, *C* и *D*.

Для определения координат точки *D* (X_d, Y_d) применим теорему косинусов. Далее для определения координат точки *D* (X_d, Y_d) необходимо

составить уравнение 4-й степени. После определения координат точки $D (X_d, Y_d)$ необходимо определить отрезок AD :

$$AD = \sqrt{(X_d - X_a)^2 + (Y_d - Y_a)^2}.$$

По AD и R определим поправку на долготу (η):

$$\eta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{AD}{2R}\right). \quad (7)$$

Определяем долготу ИРИ (ν):

Долгота ИРИ $\nu = \theta - \eta$ (если ИРИ западнее МКА) (8)

Долгота ИРИ $\nu = \theta + \eta$ (если ИРИ восточнее МКА) (9)

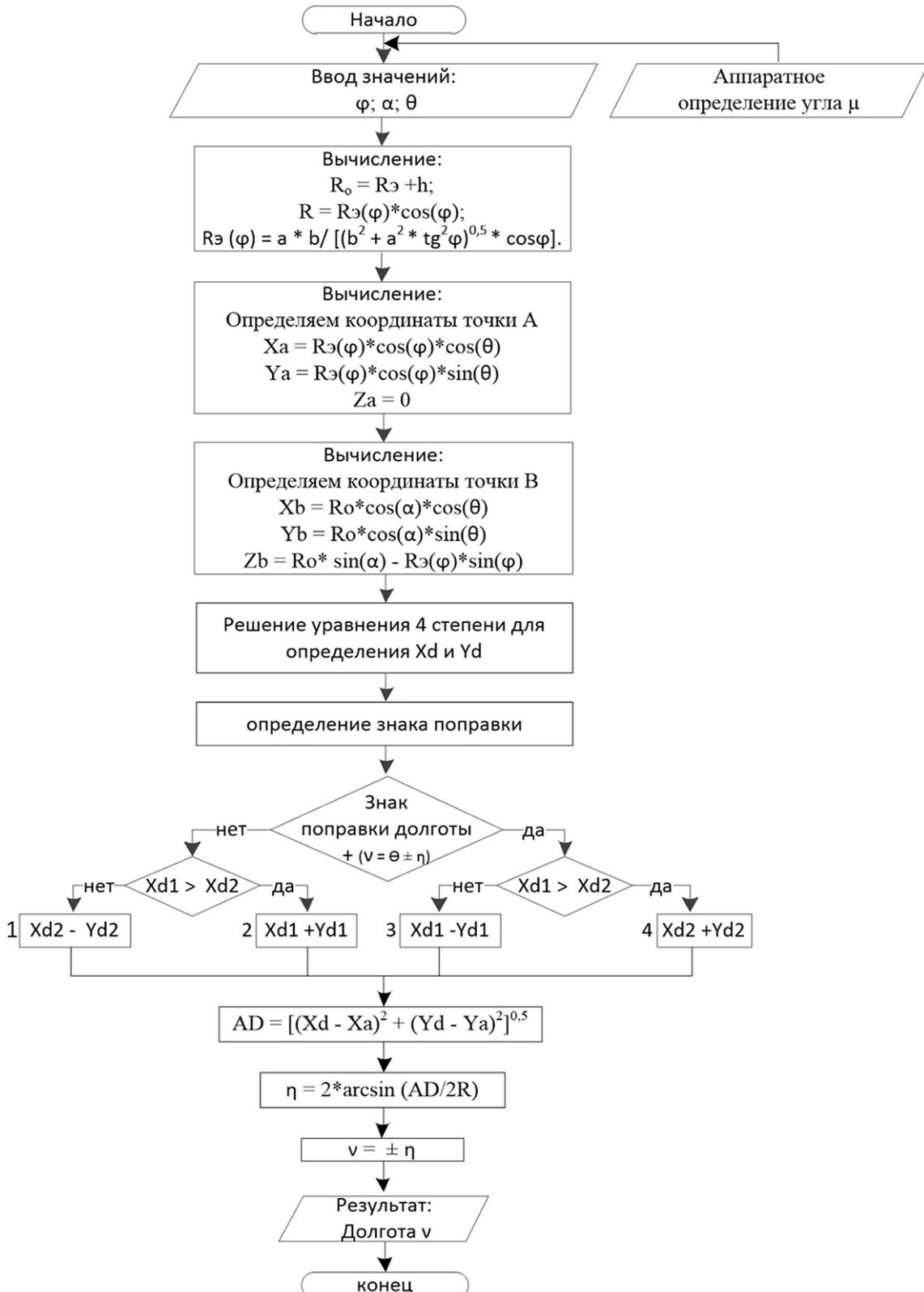


Рисунок 3 – Алгоритм определения долготы ИРИ

Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рисунке 3. Приложение программной реализации приведено на рисунке 3, разработанное на языке C#.

Разработанные алгоритмы и программы для определения широты и долготы ИРИ предлагаются для применения в спутниковых системах радиомониторинга на базе одного МКА.

Выводы

Разработаны метод, алгоритмы и компьютерная программа для определения координат

наземных ИРИ на базе угломерного метода с применением одного МКА. Рассмотрены возможные погрешности определения координат ИРИ по предложенным алгоритмам. Данный метод целесообразно использовать на начальных этапах разработки спутниковой системы радиомониторинга. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку эффективных антенных систем типа АФАР и методов повышения надежности обнаружения и распознавания радиосигналов ИРИ для повышения качества радиомониторинга.

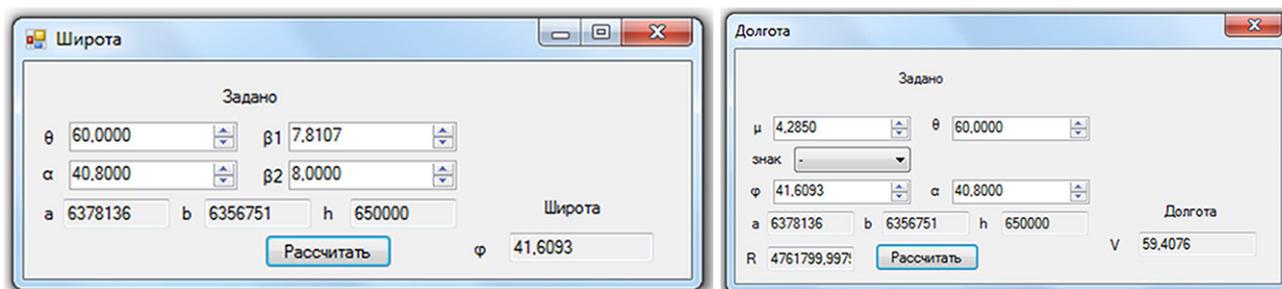


Рисунок 4 – Окно приложения программы для определения широты и долготы ИРИ

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке КН МОН РК по программе грантового финансирования научных исследований на 2020-2022 гг., грант №АР08857146.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A., Smolskiy S.M. Radio Monitoring: Automated Systems and Their Components. – Springer, 2018. – 486 p.
2. Официальный сайт РГП «Государственная радиочастотная служба» Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности РК. <https://rfs.gov.kz> 20.03.2022.
3. Dempster A.G., Cetin E. Interference Localization for Satellite Navigation Systems // Proceedings of the IEEE. 2016. – Т. 104. – № 6. – С. 1318-1326.
4. Comparison of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival methods of signal geolocation: report ITU-R / SM Series, Spectrum management. – ITU: Geneva, Switzerland, 2018. – 26 p. – No. SM.2211-2.
5. Takeshi A., Nobuhiro S. TDOA/FDOA geolocation in space radio monitoring using RLMS and gating // IEICE Communications Express. 2019. – Vol. 8, no. 6. – Pp. 207-212.
6. Cao Y et al. A new iterative algorithm for geolocating a known altitude target using TDOA and FDOA measurements in the presence of satellite location uncertainty // Chinese Journal of Aeronautics. – 2015, no. 5. – Pp. 1510-1518.
7. Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е., Кожаметова Б.А., Жаксылық А.Ж. Оценка энергетического бюджета для системы радиомониторинга на базе низкоорбитальных спутников // Вестник АУЭС. – Алматы, 2019. – № 4 (47). – С. 88-95.
8. Aitmagambetov A.Z., Butuzov Yu.A., Kulakayeva A.E. Mathematical models for determining the location of radio emission sources in radio monitoring systems on the basis on low-orbit satellites // T-Comm. – 2016. – Vol. 10, no. 1. – Pp. 73-76.
9. Levanon N. Quick position determination using 1 or 2 LEO satellites, in Aerospace and Electronic Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1998, T. 34. – No. 3. – Pp. 736-754.
10. Патент на полезную модель 6346 Республики Казахстан, МПК G01S 5/00. Способ определения местоположения источников радиоизлучения с помощью низкоорбитального малого космического аппарата / Кулакаева А.Е., Айтмагамбетов А.З., Бутузов Ю.А., Кожаметова Б.А.; заявитель и патентообладатель Международный университет информационных технологий. – № 2021/0332.2; заявл. 06.04.21; опубл. 08.10.21, Бюл. № 33, 20.08.2021. – 3 с.

Шағын ғарыш аппараты негізінде жерсеріктік радиомониторинг жүйесі үшін радиосәуле тарату көздерінің координаттарын анықтау

^{1*}КУЛАКАЕВА Айгуль Ергалиевна, PhD, ассистент-профессор, aigul_k.pochta@mail.ru,

¹ДАЙНЕКО Евгения Александровна, PhD, қауымдастырылған профессор, y.daineko@edu.iitu.kz,

¹АЙТМАГАМБЕТОВ Алтай Зуфарович, т.ф.к., профессор, a.aitmagambetov@iitu.edu.kz,

¹ОНГЕНБАЕВА Жадыра Жумабековна, магистр, сениор-лектор, zh.ongenbayeva@iitu.edu.kz,

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан, Алматы, Манас көшесі, 34/1,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қазіргі кезде қолданыстағы жерүсті радиомониторинг құралдарының шеңберінде радиобақылаудың функциялары мен міндеттерін сапалы орындау мүмкін емес. Қазақстан Республикасы сияқты территориясы үлкен елдер үшін радиожуілік спектрін пайдалану радиомониторинг жүйесінің тиімділігін арттыру үшін радиобақылау станциялары ретінде төмен орбиталы шағын ғарыш аппараттарды пайдалану тиімді болып табылады. Жұмыста бұрыштық өлшеу әдісіне негізделген радиосәуле тарату көзінің координаттарын анықтау үшін әзірленген әдісі қарастырылған. Алгоритмдер ұсынылып, радиосәуле тарату көзінің орналасқан жерін анықтау үшін компьютерлік бағдарлама жасалды. Әзірленген әдіс бір шағын ғарыш аппараты негізінде радиомониторинг жүйесін әзірлеудің бастапқы кезеңдерінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілт сөздер: радиосәуле тарату көзі, радиомониторинг, координаттарды анықтау, төмен орбиталы жерсерік, шағын ғарыш аппараты, радиожуілік спектрі.

Determination of Coordinates of Radio Emission Sources for a Satellite Radio Monitoring System Based on a Small Spacecraft

¹*KULAKAYEVA Aigul, PhD, Assistant Professor, aigul_k.pochta@mail.ru,

¹DAINEKO Yevgeniya, PhD, Associate Professor, y.daineko@edu.iitu.kz,

¹AITMAGAMBETOV Altai, Cand. of Tech. Sci., Professor, a.aitmagambetov@iitu.edu.kz,

¹ONGENBAYEVA Zhadyra, Master, Senior Lecturer, zh.ongenbayeva@iitu.edu.kz,

¹International Information Technology University, Kazakhstan, Almaty, Manas Street, 34/1,

*corresponding author.

Abstract. To date, within the framework of existing ground-based radio monitoring facilities, it is impossible to qualitatively perform the functions and tasks of radio monitoring. For countries with a large territory, such as the Republic of Kazakhstan, it is advisable to use low-orbit small spacecraft as radio monitoring stations to increase the efficiency of the radio monitoring system for the use of the radio frequency spectrum. The paper considers the developed method for determining the coordinates of a radio emission source based on the angle-measuring method. Algorithms are proposed and a computer program is compiled to determine the location of the radio source. The developed method can be used at the initial stages of the development of a radio monitoring system based on a single small spacecraft.

Keywords: source of radio communication, radiomonitoring, coordinate determination, low-orbital satellite, small space apparatus, radio frequency spectrum.

REFERENCES

1. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A., Smolskiy S.M. Radio Monitoring: Automated Systems and Their Components. – Springer, 2018. – 486 p.
2. Official website of RSE «State Radio Frequency Service» Ministry of Digital Development, Innovation and Aerospace Industry of the Republic of Kazakhstan. <https://rfs.gov.kz> 20.03.2022.
3. Dempster A.G., Cetin E. Interference Localization for Satellite Navigation Systems // Proceedings of the IEEE. 2016. – T. 104. – No. 6. – Pp. 1318-1326.
4. Comparison of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival methods of signal geolocation: report ITU-R / SM Series, Spectrum management. – ITU: Geneva, Switzerland, 2018. – 26 p. – No. SM.2211-2.
5. Takeshi A., Nobuhiro S. TDOA/FDOA geolocation in space radio monitoring using RLS and gating // IEICE Communications Express. 2019. – Vol. 8, no. 6. – Pp. 207-212.
6. Cao Y et al. A new iterative algorithm for geolocating a known altitude target using TDOA and FDOA measurements in the presence of satellite location uncertainty // Chinese Journal of Aeronautics. – 2015, no. 5. – Pp.1510-1518.
7. Aitmagambetov A.Z., Kulakayeva A.Ye., Kozhakhmetova B.A., Zhaksylyk A.Zh. Assessment of the energy budget for a radio monitoring system based on low-orbit satellites // Vestnik AUES. – Almaty, 2019. – No. 4 (47). – Pp. 88-95.
8. Aitmagambetov A.Z., Butuzov Yu.A., Kulakayeva A.E. Mathematical models for determining the location of radio emission sources in radio monitoring systems on the basis on low-orbit satellites // T-Comm. – 2016. – Vol. 10, no. 1. – Pp. 73-76.
9. Levanon N. Quick position determination using 1 or 2 LEO satellites, in Aerospace and Electronic Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1998, T. 34. – No. 3. – Pp. 736-754.
10. Utility model patent 6346 of the Republic of Kazakhstan, MPK G01S 5/00. Method of determination locations of radio emission sources using a low-orbit small spacecraft / Kulakayeva A.Ye., Aitmagambetov A.Z., Butuzov Yu.A., Kozhakhmetova B.A.; applicant and patent holder International University of Information Technology. – No. 2021/0332.2; declar. 06.04.21; publish. 08.10.21, Bulletin. No. 33, 20.08.2021. – 3 p.