

МРНТИ 49.43.31
УДК 621.396

<https://doi.org/10.51889/3809.2022.27.49.007>

А.Е. Кулакаева^{1*}, Е.А. Дайнеко¹, А.З. Айтмагамбетов¹, Ж.Ж. Онгенбаева¹, Б.А. Кожяхметова^{1,2}

¹ *Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан*

² *Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан*
**e-mail: aigul_k.pochta@mail.ru*

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ СПУТНИКОВОМ РАДИОМОНИТОРИНГЕ

Аннотация

В данной статье обоснована возможность повышения точности определения координат источников радиоизлучения при помощи многократного измерения параметров наземного источника радиоизлучения, где определение пеленгов производят в нескольких (не менее двух) точках орбиты низкоорбитального малого космического аппарата. Предложенный алгоритм даст возможность выполнения обработки данных с меньшими временными затратами, следовательно, более эффективен, чем при использовании метода итераций. Также он может служить основой для оценки и анализа параметров сигналов источников радиоизлучения в широком диапазоне частот с возможностью местоопределения источников радиоизлучений. В работе также представлена программа для определения координат широты и долготы источника радиоизлучения с помощью измерения в двух разных точках орбиты малого космического аппарата. Компьютерная программа выполнена на языке C#.

Ключевые слова: спутниковый радиомониторинг, определение координат РЭС, низкоорбитальный малый космический аппарат, радиочастотный спектр, источник радиоизлучения, активная фазированная антенная решетка.

Аңдатпа

А.Е. Кулакаева¹, Е.А. Дайнеко¹, А.З. Айтмагамбетов¹, Ж.Ж. Онгенбаева¹, Б.А. Кожяхметова^{1,2}

¹ *Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан*

² *Г. Даукеев атындағы алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан*

ЖЕРСЕРІКТІК РАДИОМОНИТОРИНГ КЕЗІНДЕ ЖЕРҮСТІ РАДИОЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫҢ КООРДИНАТТАРЫН АНЫҚТАУ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУ

Берілген мақалада төмен орбиталы шағын ғарыш аппараты орбитасының бірнеше (кемінде екі) нүктелерінде жүргізілетін пеленгтерді анықтау барысында радиосәуле таратудың жердегі көзінің параметрлерін бірнеше рет өлшеу арқылы радиосәуле шығару көздерінің координаттарын анықтау дәлдігін арттыру мүмкіндігі негізделген. Мақалада ұсынылған алгоритм деректерді өңдеуде аз уақыт жұмсауға мүмкіндік береді, сондықтан итерация әдісін қолданғаннан гөрі тиімді. Ол радиосәуле тарату көздерін анықтау мүмкіндігімен жиіліктердің кең диапазонында радиосәуле тарату көздерінің сигналдарының параметрлерін бағалау және талдау үшін негіз бола алады. Жұмыста шағын ғарыш аппараты орбитасының екі түрлі нүктесінде өлшеу арқылы радиосәуле тарату көзінің ендік және бойлық координаттарын анықтауға арналған бағдарлама ұсынылған. Бұл компьютерлік бағдарлама C# тілінде жасалған.

Түйін сөздер: жерсеріктік радиомониторинг, РЭҚ координаттарын анықтау, төмен орбиталық шағын ғарыш аппараты, радиожілік спектрі, радиосәулелендіру көзі, белсенді фазаланған антенна торы.

Abstract

IMPROVING THE ACCURACY OF DETERMINING THE COORDINATES OF GROUND-BASED RADIOELECTRONIC MEANS IN SATELLITE RADIO MONITORING

Kulakayeva A.E.¹, Daineko Y.A.¹, Aitmagambetov A.Z.¹, Ongenbayeva Zh.Zh.¹, Kozhakhmetova B.A.^{1,2}

¹ *International information technologies university, Almaty, Kazakhstan*

² *Almaty university of power engineering and telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan*

This article substantiates the possibility of increasing the accuracy of determining the coordinates of radio emission sources by repeatedly measuring the parameters of a ground-based radio emission source, where the bearings are determined at several (at least two) points of the orbit of a low-orbit small spacecraft. The proposed algorithm will make it possible to perform data processing with less time, therefore, it is more efficient than using the iteration method. It can also serve as a basis for evaluating and analyzing the parameters of radio emission source signals in a wide frequency range with the possibility of locating radio emission sources. The paper also presents a program for determining the

latitude and longitude coordinates of a radio source by measuring at two different points in the orbit of a small spacecraft. This computer program is made in C#.

Keywords: satellite radio monitoring, determination of REM coordinates, low-orbit small spacecraft, radio frequency spectrum, radio emission source, active phased array antenna.

Введение

Органы регулирования использования радиочастотного спектра (РЧС) в каждой стране должны регулярно осуществлять радиоконтроль за радиоэлектронными средствами (РЭС) на своей территории. Это необходимо для определения соответствия параметров излучения радиоэлектронных средств соответствующим нормам и условиям разрешений на использование РЧС. Кроме того, службы радиоконтроля обязаны обнаруживать незаконно действующие радиопередающие устройства и источники радиопомех. В повседневной деятельности у органов контроля по использованию спутниковых ресурсов возникает необходимость получать информацию по параметрам несущих, местоположению источника сигнала и легальности его работы [1-2].

В настоящее время проводятся исследования и разработка систем радиомониторинга с помощью низкоорбитальных малых космических аппаратов. Известны зарубежные разработки подобных систем. В частности, американские компании Lockheed Martin, Deep Space и HawkEye совместно с агентством перспективных исследований МО США (DARPA) создают спутниковую систему высокоточных карт (Radio Map Space) для обнаружения и анализа использования радиочастот. Это может повысить потенциал силовых структур в сфере радиоэлектронной борьбы [3]. Кроме проекта американских компаний французское оборонное агентство DGA совместно с космическим агентством CNES в 2011 г. реализовало систему радиопеленга наземных радиоисточников ELISTA состоящую из 4-х микроспутников, построенных на платформе Miriad компании EADS Astrium. Подобная система создается и в России на базе проекта «Гонец» с возможностью передачи накопленной оперативной информации с низколетящих космических аппаратов через геостационарные ретрансляторы используя межспутниковые линии связи [4-5].

Для определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) известны методы, основанные на уровне принимаемого сигнала (RSS - received signal strength), фазе несущей сигнала (POA - carrier phase of arrival), разнице времени прихода (TDOA - time difference of arrival), угле прихода (AoA) (или направлении прихода DOA), разнице частоты прихода (FDOA - frequency difference of arrival), доплеровской разнице частот (doppler difference - DD) и комбинированные методы, состоящие из двух или более вышеперечисленных методов [6-8]. На сегодняшний день в спутниковых системах наибольшее распространение получили методы TDOA и FDOA [9-12]. 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.

Для определения координат РЭС предлагается структурная схема бортового оборудования космического сегмента системы радиомониторинга, представленная на рисунке 1. 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 РЭС. Обнаруженные сигналы от РЭС поступают в приемник и далее подвергаются обработке.

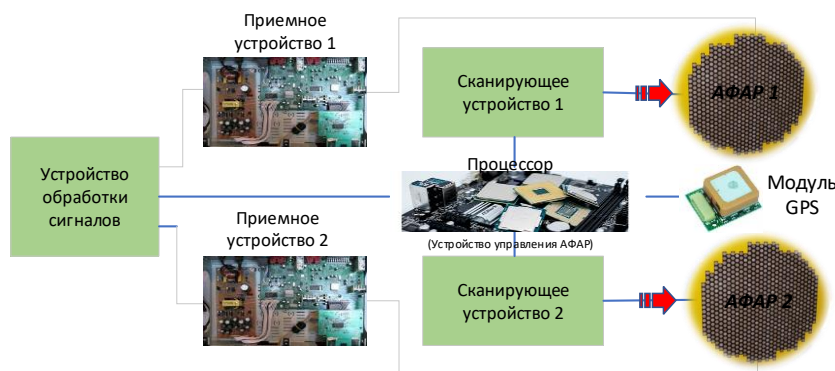


Рисунок 1. Структурная схема бортового оборудования космического сегмента

Методы и результаты исследования

С целью повышения точности определения координат местоположения наземных источников радиоизлучения можно проводить измерения из нескольких (2, 3, 4...N) точек орбиты МКА в пределах видимости источников радиоизлучения, как показано на рисунке 2 [13].

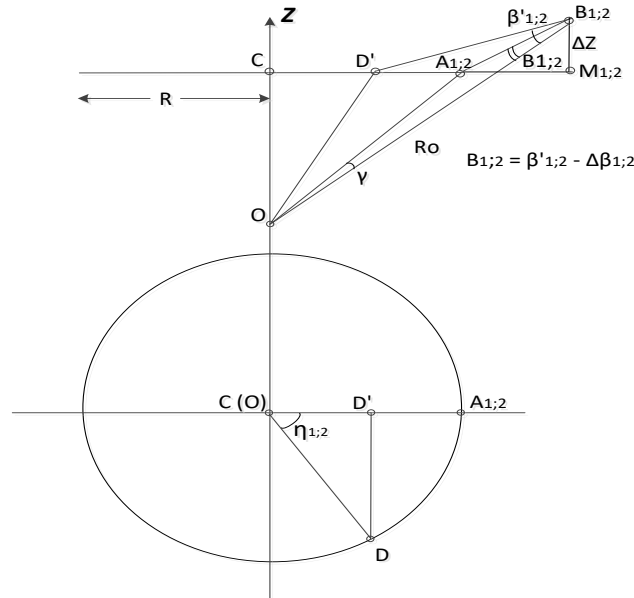


Рисунок 2. Определение координат наземного источника радиоизлучения на основе многократных измерений

При сканировании луча антенны МКА вдоль меридиана фиксируется сигнал от источников радиоизлучения и определяется в этот момент аппаратно широта точки B_2 нахождения МКА α_2 ; долгота точки B_2 нахождения МКА θ_2 ; угол между направлениями от МКА на центр масс Земли (O) и источник радиоизлучения β'_2 . Повторно сигнал от источников радиоизлучения фиксируется на следующей точке B и определяются аппаратно широта α_1 и долгота θ_1 , а также угол β'_1 . Определяется $\Delta\gamma = \alpha_1 - \alpha_2$ и вычисляются координаты точки B_2 .

При сканировании второго луча антенны МКА вдоль параллели фиксируется сигнал от источников радиоизлучения и определяется в этот момент аппаратно угол μ_2 и по нему вычисляем поправку на долготу η_2 . При сканировании луча антенны МКА вдоль меридиана с новой точки фиксируется сигнал от источников радиоизлучения и определяются в этот момент аппаратно широта точки B_1 нахождения МКА α_2 ; долгота точки B_1 нахождения МКА θ_2 ; угол между направлениями от МКА на центр масс Земли (O) и источников радиоизлучения. Необходимо вычислить координаты точки B_1 .

При сканировании второго луча антенны МКА вдоль параллели с новой точки фиксируется сигнал от источников радиоизлучения и определяется в этот момент аппаратно угол μ_1 и по нему вычисляем поправку на долготу η_1 . Затем вычисляем $\Delta\gamma$, k и γ . Определяется широта φ_1 .

Радиус эллипсоида Земли R_Σ - отрезок, соединяющий центр масс Земли O с точкой на эллипсоиде D. Вычисляются координаты точки A_2 и A_1 . Одновременно для двух точек нахождения МКА сигнал от источников радиоизлучения фиксируется лучом АФАР сканирующей в ортогональном направлении первому лучу и в этот момент аппаратно определяются углы μ_2 и μ_1 (между направлениями от точек B_2 и B_1 на точку A и точку D, где находится источник радиоизлучения).

Решая уравнение 4-й степени, определяем поправку на долготу η_2 и η_1 . Долгота местонахождения источников радиоизлучения будет $v_1 = \theta_1 \pm \eta_1$ и $v_2 = \theta_2 \pm \eta_2$ (в зависимости от знака поправки).

При нахождении источника радиоизлучения в точке D для 2-х поправок на долготу η .

- определяем $D'A = R \cdot (1 - \cos\eta)$, где $R = AC$
- определяем AM по координатам точек A и B
- определяем $D'M = D'A + AM$
- определяем угол $D'BM = \arctg(BM/D'M)$

-определяем угол АВМ

-определяем угол D'BA=D'BM-угол АВМ - это увеличение угла β за счет наличия поправки на долготу, хотя широта та же.

-определяем угол $\beta_2=\beta_1$ -угол D'BA

Вычисляем k_1 и γ_1 . Затем определяется широта φ_2 .

После определения широты источников радиоизлучения φ перейдем к определению долготы. Рассмотрим особенности определения долготы источников радиоизлучения на основе анализа параметров треугольников ABD, ACD, BCD, приведенных на рисунке 2. Сканирование лучом относительно точки А осуществляется вдоль параллели, соответствующей широте φ , в западном и восточном направлении. При появлении сигнала фиксируется направление на источник радиоизлучения с помощью угла μ (μ – угол между направлениями от МКА (точка В) на источник радиоизлучения (точка D) и на точку А), а также знак поправки на долготу η относительно долготы МКА (θ) – западное направление (-), восточное – (+). На рисунке 2 показано только западное местоположение источников радиоизлучения (точка D), аналогично точка D может быть под таким же углом μ в восточном направлении.

Точка А – точка пересечения рассмотренной выше параллели со следом орбиты МКА на земной поверхности. Точка С находится на оси OZ в месте пересечения ее плоскостью по параллели, на которой находится источник радиоизлучения (то есть на той же широте). Данное сечение представляет собой окружность, на которой лежат точки А и D, а точка С – центр этой окружности. Радиус окружности $R=AC=DC=R_3(\varphi)\times\cos\varphi$.

Сторона BC - расстояние между МКА и точкой С, сторона BD - расстояние между МКА и источником радиоизлучения, сторона BA – расстояние между МКА и точкой А, сторона AD (хорда окружности), знание которой необходимо для определения поправки η . Для определения всех расстояний необходимы координаты точек А, В, С и D.

Далее определяются координаты точки А, местоположения МКА (точка В) и координаты точки С, следовательно необходимо определить расстояния AC, BC и BA. Для определения координат точки D (X_d, Y_d) применяется теорема косинусов и составляется уравнение (4-й степени). После определения координат точки D (X_d, Y_d) определяется отрезок AD. Далее по AD и R определяется поправка на долготу (η) (знак поправки на долготу η относительно долготы МКА (θ) – западное направление (-), восточное – (+).

Блок-схема алгоритма для определения местоположения (широты и долготы) источников радиоизлучения с помощью измерения в двух разных точках орбиты МКА приведена на рисунке 3.

Далее рассмотрим на примере, когда источник радиоизлучения находится на широте $\varphi=41,6^\circ$. В таблице 1 приведены исходные данные для измерения в нескольких точках при определении координат РЭС, а в таблице 2 приведены погрешности в линейных размерах при многократном измерении.

Таблица 1. Исходные данные для измерения в нескольких точках при определении координат РЭС

Источник радиоизлучения на широте φ	41,6
МКА в точке В1 (близкая к источникам радиоизлучения) на широте α_1	41,2
МКА в точке В2 (средняя) на широте α_2	41
МКА в точке В3 (ранняя) на широте α_3	40,8
МКА в точке В4 (самая ранняя) на широте α_4	40,6

Таблица 2. Погрешности в линейных размерах при многократном измерении

Погрешность	0,6 (-40%)	0,7 (-30%)	0,8 (-20%)	0,9 (-10%)	0	1,1 (10%)	1,2 (20%)	1,3 (30%)	1,4 (40%)
$\Delta\varphi_{12}$ (м)	183,1	145,1	102,0	53,6	0	58,7	122,7	191,7	266,0
$\Delta\varphi_{13}$ (м)	292,5	231,8	162,8	85,5	0	93,8	195,8	306,1	424,5
$\Delta\varphi_{14}$ (м)	425,6	337,2	236,9	124,4	0	136,4	284,8	445,1	617,3

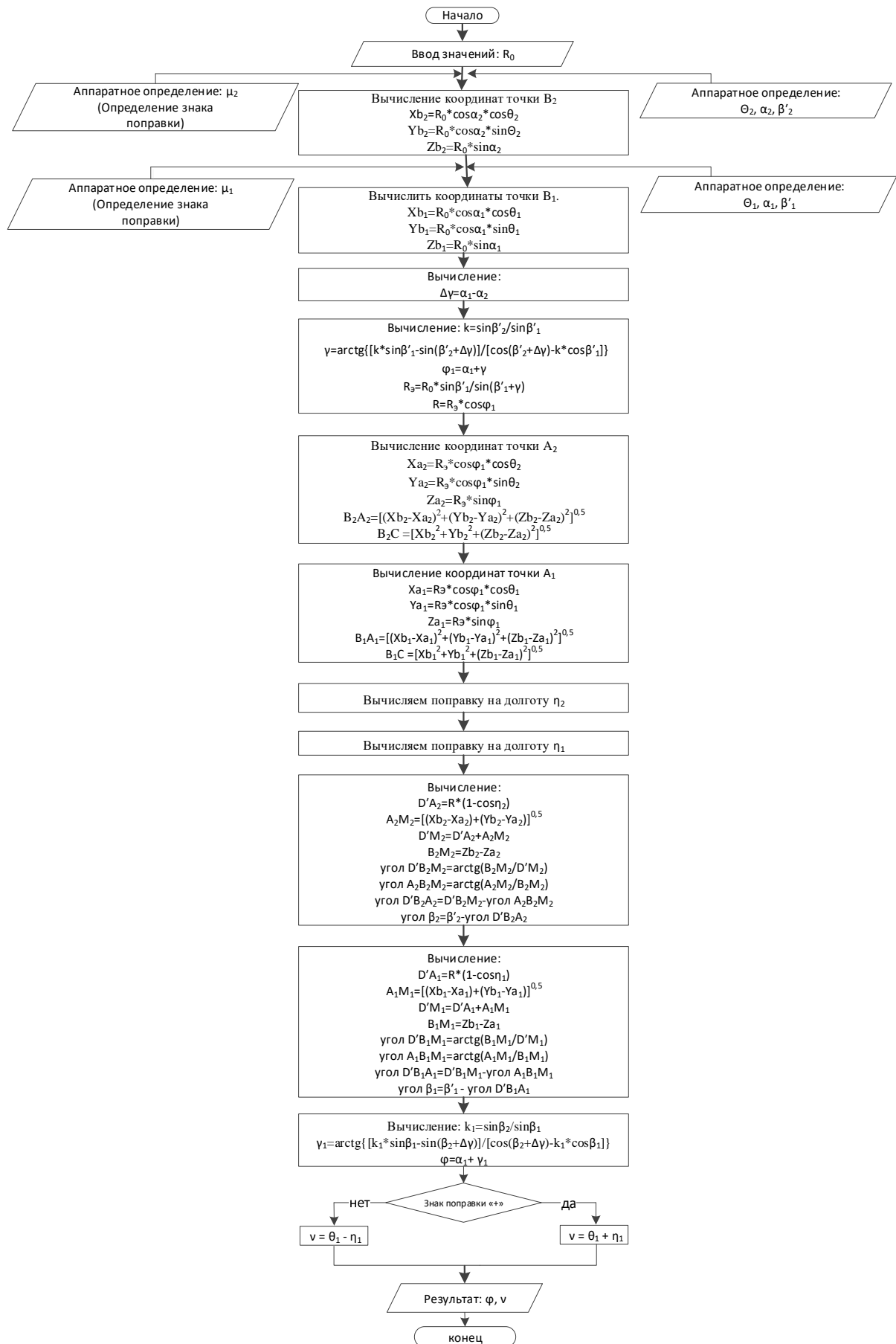


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма определения местоположения источников радиоизлучения

Как показано на рисунке 4, при многократном измерении погрешности, возникающие при определении координат РЭС в линейных размерах уменьшаются в зависимости от количества измерений.

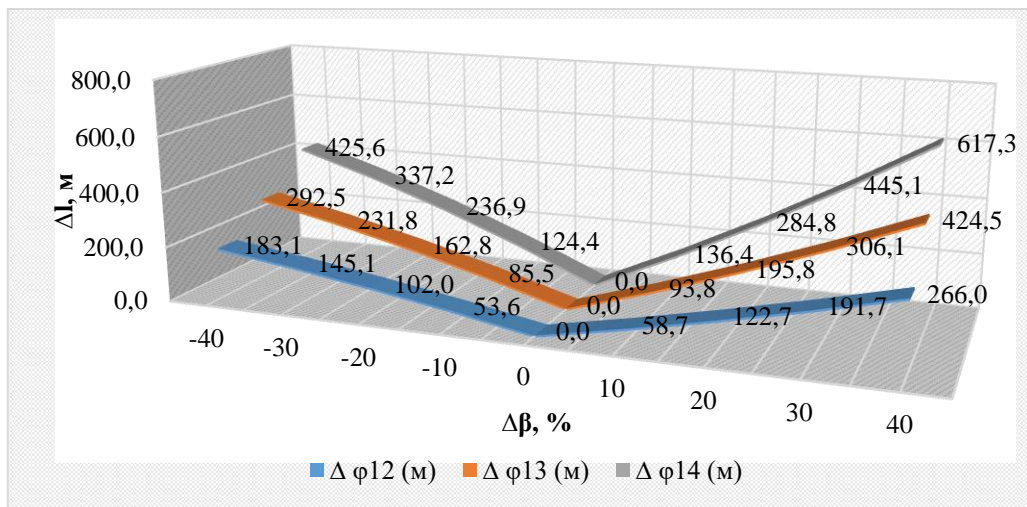


Рисунок 4. Погрешности, возникающие при определении координат источников радиоизлучения в линейных размерах

На основе вышеизложенного была составлена программа для определения координат (широты и долготы) ИРИ с помощью измерения в двух разных точках орбиты МКА, которая приведена на рисунке 5.

а) Поправка на долготу η положительное

б) Поправка на долготу η отрицательное

Рисунок 5. Разработанная программа для определения координат РЭС с помощью измерения в двух разных точках орбиты МКА

Для повышения точности определения координат местоположения наземных РЭС можно проводить несколько измерений из большого количества (3, 4...N) разных точек орбиты МКА в пределах видимости РЭС.

В работах [14-16] предложены методы определения координат РЭС с помощью одного спутника, т.е. однократным измерением. Однако при использовании таких измерений погрешности будут расти линейно в зависимости от ошибок определения углов сканирования [17].

Таким образом, в данной работе доказано, что при многократном измерении погрешности, возникающие при определении координат РЭС в линейных размерах уменьшаются в зависимости от количества измерений.

Также в ходе измерений из нескольких точек и путем усреднения можно минимизировать погрешности при определении координат источников радиоизлучения, а рассматриваемый алгоритм даст возможность выполнения обработки данных с меньшими временными затратами, следовательно, более эффективен, чем при использовании метода итераций [14].

Заключение

Применение космических аппаратов в системах радиомониторинга позволит определять параметры сигналов и местоположение РЭС на большой территории с разнообразным рельефом местности, что позволит повысить эффективность систем радиоконтроля.

С целью повышения точности определения координат наземных РЭС предложен метод на основе многократного измерения параметров наземного источника радиоизлучения. Разработаны алгоритм и компьютерная программа на языке C#.

Определение координат РЭС на базе разработанного метода с применением одного низкоорбитального МКА можно осуществлять на начальных этапах разработки спутниковых систем радиомониторинга.

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

Список использованных источников:

1 Кизима С. В. Объекты и средства радиоконтроля. Совместное развитие технологий радиосвязи и радиоконтроля // *Электросвязь*, – 2018. – №11. – С. 68-74.

2 Официальный сайт РГП «ГРС» [Электронный ресурс]. – URL: <https://rfs.gov.kz/> / (дата обращения 01.06.2022)

3 Айтмагамбетов А.З., Бутузов Ю.А., Кулакаева А.Е., Сатеров Н.М. Вопросы анализа сигналов и опознавания передатчиков при спутниковом радиомониторинге // *Вестник КазАТК*, Алматы, – 2015. – №5-6(95). – С.49-51.

4 Митько А. В. Перспективы развития единой инфокоммуникационной системы Арктической зоны Российской Федерации // *Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал*, – 2018. – Т. 1, №5 – С. 58-68.

5 Савельева О. А., Савельев И. С. Перспективные низкоорбитальные системы спутниковой связи // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, – 2019. – Т.1. – С. 487-489.

6 Dempster A. G., & Cetin, E. (2016). *Interference Localization for Satellite Navigation Systems. Proceedings of the IEEE*, 104(6), 1318-1326. [7439734]. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2530814>

7 Report ITU-R SM.2211-2. (06/2018). *Comparison of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival methods of signal geolocation. SM Series, Spectrum management.*

8 Zhao L., Yao G. and Mark J.W. *Mobile positioning based on relaying capability of mobile stations in hybrid wireless networks. IEE Proc.-Commun.*, Vol. 153, No. 5, October 2006.

9 Ho K. C. and Chan Y. T. *Geolocation of a Known Altitude Object From TDOA and FDOA Measurements, in IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, vol. 33, pp. 770–783.

10 Takeshi Amishimaa) and Nobuhiro Suzuki. *TDOA/FDOA geolocation in space radio monitoring using RLMS and gating. IEICE Communications Express*, Vol.8, No.6, 207–212

11 Yan H., Cao J. K. and Chen L. *Study on location accuracy of dual-satellite, ICSP*, pp. 107–110, 2010. DOI:10.1109/ICOSP.2010.5656806

12 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, Chin J Aeronaut (2015)*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2015.08.015>.

13 Кулакаева А.Е., Айтмагамбетов А.З., Бутузов Ю.А., Кожаметова Б.А. *Способ определения местоположения источников радиоизлучения с помощью низкоорбитального малого космического аппарата. Патент на полезную модель № 6346 от 06.04.2021 года.*

14 Aitmagambetov, A., Butuzov, Y., Tikhvinskiy, V., Kulakayeva, A., Ongenbayeva, Z. Energy budget and methods for determining coordinates for a radiomonitoring system based on a small spacecraft // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, –2021. – 21(2). – pp. 945–956

15 Levanon, N., Quick position determination using 1 or 2 LEO satellites // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, –1998. – Vol.34, №3. – pp.736-754

16 Levanon N. Instant active positioning with one LEO satellite // *Navigation*, –1999. – Vol.46, №2. – pp. 87-95.

17 Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е., Онгенбаева Ж.Ж. Бір төмен орбиталы шағын ғарыш аппаратының көмегімен радиосәуле тарату көздерінің орналасқан жерін анықтау кезіндегі қателікті бағалау. // *Международная научно-теоретическая конференция: 30 лет независимости Казахстана: достижения и перспективы развития науки и образования. 26 ноября 2021 года, Караганда, 2021.*

References:

1 Kizima S. V. (2018) *Ob#ekty i sredstva radiokontrolja. Sovmestnoe razvitie tehnologij radiosvjazi i radiokontrolja [Objects and means of radio monitoring. Joint development of radio communication and radio monitoring technologies].* *Jelektrosvjaz'*, 2018, №11, 68-74. (In Russian)

2 *Oficial'nyj sajt RGP «GRS» [Official website of RSE «RFS»].* – URL: <https://rfs.gov.kz/>

3 Aitmagambetov A.Z., Butuzov Ju.A., Kulakaeva A.E., Saterov N.M. (2015) *Voprosy analiza signalov i opoznavanija peredatchikov pri sputnikovom radiomonitoriinge [Issues of signal analysis and identification of transmitters in satellite radio monitoring].* *Vestnik KazATK, Almaty, №5-6(95), 49-51.* (In Russian)

4 Mit'ko A. V. (2018) *Perspektivy razvitija edinoj infokommunikacionnoj sistemy Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii [Prospects for the development of a unified information and communication system of the Arctic zone of the Russian Federation].* *Trudy CNIIS. Sankt-Peterburgskij filial, T.1, №5, 58-68.* (In Russian)

5 Savel'eva O. A., Savel'ev I. S. (2019) *Perspektivnye nizkoorbital'nye sistemy sputnikovoj svjazi [Prospective low-orbit satellite communication systems].* *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki, T.1, 487-489.* (In Russian)

6 Dempster A. G., & Cetin, E. (2016). *Interference Localization for Satellite Navigation Systems. Proceedings of the IEEE, 104(6), 1318-1326.* [7439734]. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2530814>

7 Report ITU-R SM.2211-2. (06/2018). *Comparison of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival methods of signal geolocation. SM Series, Spectrum management.*

8 Zhao L., Yao G. and Mark J.W. *Mobile positioning based on relaying capability of mobile stations in hybrid wireless networks. IEE Proc.-Commun., Vol. 153, No. 5, October 2006.*

9 Ho K. C. and Chan Y. T. *Geolocation of a Known Altitude Object From TDOA and FDOA Measurements, in IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1997, vol. 33, pp. 770–783.*

10 Takeshi Amishimaa) and Nobuhiro Suzuki. *TDOA/FDOA geolocation in space radio monitoring using RLMS and gating. IEICE Communications Express, Vol.8, No.6, 207–212*

11 Yan H., Cao J. K. and Chen L. *Study on location accuracy of dual-satellite, ICSP, pp. 107–110, 2010. DOI:10.1109/ICOSP.2010.5656806*

12 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, Chin J Aeronaut (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2015.08.015>.*

13 Kulakayeva A.E., Aitmagambetov A.Z., Butuzov Ju.A., Kozhakhmetova B.A. (2021) *Sposob opredelenija mestopolozhenija istochnikov radioizluchenija s pomoshh'ju nizkoorbital'nogo malogo kosmicheskogo apparata [Method for determining the location of radio emission sources using a low-orbit small spacecraft]. Patent na poleznuju model' №6346 ot 06.04.2021 goda.*

14 Aitmagambetov, A., Butuzov, Y., Tikhvinskiy, V., Kulakayeva, A., Ongenbayeva, Z. Energy budget and methods for determining coordinates for a radiomonitoring system based on a small spacecraft // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, –2021. – 21(2). – pp. 945–956

15 Levanon, N., Quick position determination using 1 or 2 LEO satellites // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, –1998. – Vol.34, №3. – pp.736-754

16 Levanon N. Instant active positioning with one LEO satellite // *Navigation*, –1999. – Vol.46, №2. – pp. 87-95.

17 Aitmagambetov A.Z., Kulakayeva A.E., Ongenbaeva Zh.Zh. (2021) *Bir төмен орбиталы шағын ғарыш аппаратының көмегімен радиосәуле тарату көздерінің орналасқан жерін анықтау кезіндегі қателікті бағалау. [Estimation of error when determining the location of radio relay transmission sources using one small low-orbit spacecraft]. Mezhdunarodnaja nauchno-teoreticheskaja konferencija: 30 let nezavisimosti Kazahstana: dostizhenija i perspektivy razvitija nauki i obrazovanija. 26-nojabrja 2021 goda, Karaganda, 2021. (In Kazakh)*