

Экстремальные методы локализации источника шумового сигнала с помощью сети распределенных сенсоров

Н. Г. Джавадов¹, Х. Г. Асадов², Р. В. Казымлы¹

¹ Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика

² НИИ Аэрокосмической информатики, Баку, Азербайджанская Республика

Беспроводные сети распределенных сенсоров применяются для исследования природных ресурсов, отслеживания различных целей, мониторинга труднодоступных участков и т. д. Необслуживаемые датчики случайным образом распределяются на территории с помощью различных технических средств. Целью проводимых исследований является разработка экстремального метода локализации источника шумового сигнала. В основе разработанного метода лежит предложенный принцип экстремальной локализации источника шумового сигнала с помощью сети распределенных неподвижных приемников. Рассмотрены следующие разновидности предложенного принципа: экстремальный метод локализации источника шумообразного сигнала с помощью сети распределенных перестраиваемых сенсоров; метод выбора длин волн в соответствии с дистанцией между передатчиком и приемником. Дано математическое обоснование методов с использованием математической процедуры безусловной вариационной оптимизации. Составлены алгоритмы реализации предложенных методов.

Ключевые слова: распределенная сеть, оптимизация, шумообразный сигнал, сенсоры, локализация

Для цитирования:

Джавадов Н. Г., Асадов Х. Г., Казымлы Р. В. Экстремальные методы локализации источника шумового сигнала с помощью сети распределенных сенсоров // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 2. С. 18–24. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-2-18-24

© Джавадов Н. Г., Асадов Х. Г., Казымлы Р. В., 2020



Extreme methods of localizing a noise source using a network of distributed sensors

N. G. Dzhavadov¹, Kh. G. Asadov², R. V. Kazymly¹

¹ Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

² Research Institute of Aerospace Informatics, Baku, Azerbaijan Republic

Wireless networks of distributed sensors are used to study natural resources, track various targets, monitor hard-to-reach areas, etc. Unattended sensors are randomly distributed on the territory using various technical means. The research aims to develop an extreme method for localizing a noise source. The developed method is based on the proposed principle of extreme localization of a noise source using a network of distributed fixed receivers. The following varieties of the proposed principle are considered: an extreme method of localizing a noise signal source using a network of distributed tunable sensors; a method of selecting wavelengths by the distance between the transmitter and receiver. The mathematical substantiation of the methods using the mathematical procedure of unconditional variational optimization is given. The algorithms for the implementation of the proposed methods are compiled.

Keywords: distributed network, optimization, noise signal, sensors, localization

For citation:

Dzhavadov N. G., Asadov Kh. G., Kazymly R. V. Extreme methods of localizing a noise source using a network of distributed sensors. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 2, pp. 18–24. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-30-2-18-24

Введение

Как отмечается в работе [1], в настоящее время беспроводные сети распределенных сенсоров могут быть применены в таких целях, как исследование природных ресурсов, отслеживание различных целей, мониторинг труднодоступных участков и т.д. Необслуживаемые датчики случайным образом распределяются на территории с помощью беспилотных летательных аппаратов [2]. В качестве определителя позиций датчиков может быть использована GPS или другие навигационные системы. Вместе с тем, относительно высокая цена и энергопотребление приемников GPS не позволяет установить их на каждый датчик для определения его местоположения. По этой причине только некоторые сенсоры, называемые маяковыми или анкерными сенсорами, снабжаются приемниками GPS. Остальные сенсоры должны определять свою позицию при помощи метода локализации.

Локализация сенсора может осуществляться двумя методами:

1. Метод, основанный на измерении дистанции.
2. Метод, не использующий измерения дистанции.

В первом методе в целях локализации обычно измеряют расстояния и углы; во втором методе используют различные модели, связывающие сенсоры.

При этом как приемные, так и передающие узлы могут быть статическими (неподвижными) или динамическими (двигающимися) устройствами.

Существующие обзоры методов электромагнитной локализации сенсоров без использования GPS на настоящий момент неполные. Так, в работе [3] рассмотрены ультразвуковые системы позиционирования. В работах [4–6] рассмотрены системы локализации источников шумов в пределах помещений. При этом экстремальные системы локализации рассмотрены только в работах [7, 8], где было описано их использование для обнаружения эпицентров взрывов и землетрясений.

Необходимо различать системы локализации и системы позиционирования. Отметим следующие признаки систем локализации:

- локализуемый объект является генеративным, т.е. излучает сигнал;
- локализирующие сенсоры не являются генеративными и работают в режиме пассивного приема.

В свою очередь, системы позиционирования обладают следующими признаками:

- позиционируемый узел не является генеративным и работает в режиме пассивного приема;
- позиционирующие узлы являются генеративными и распространяют свои сигналы на поля позиционирования.

При решении задач локализации используются следующие виды измерений:

- измерение угла поступления сигнала;
- измерение расстояний между локализуемыми узлами и локализирующим сенсором;
- измерение силы радиосигнала.

При этом измерение расстояний может быть осуществлено при наличии следующих данных:

- данные о времени распространения сигнала;
- данные о силе принимаемого сигнала;
- данные о физической взаимосвязи приемника и передатчика.

Далее в настоящей статье принцип экстремальной локализации, изложенный впервые в [7, 8], будет применен для случая использования физических закономерностей взаимосвязи приемника и передатчика на примере уравнения Фрииса.

Метод решения задачи локализации путем подбора эффективной площади апертуры антенны

Следует отметить, что базовым уравнением, определяющим принятый сигнал в качестве функции мощности переданного сигнала, усиления антенны, расстояния и частоты, является уравнение Фрииса. При этом следует учесть, что S – плотность мощности, излучаемой антенной, – определяется как [9]

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2} \left(\frac{BT}{m^2} \right), \quad (1)$$

где R – расстояние между передатчиком и приемником; P_t – излучаемая мощность.

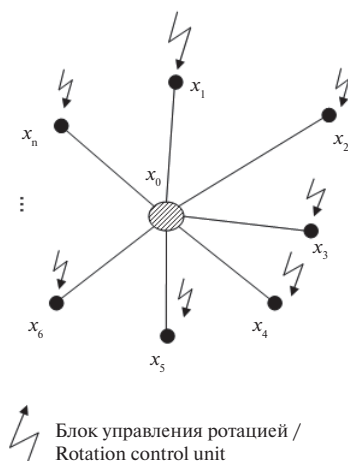


Рисунок 1. Геометрическая интерпретация локализации источника x_0 с помощью синхронно управляемых сенсоров $x_i; i = \overline{1, n}$
Figure 1. Geometric interpretation of the localization of the x_0 source using synchronously controlled sensors $x_i; i = \overline{1, n}$

Мощность сигнала, принятого приемной антенной P_r , определяется следующим уравнением Фрииса:

$$P_r = A_e S = \frac{G_t P_t A_e}{4\pi R^2} (BT) \quad (2)$$

где A_e – эффективная площадь апертуры антенны; G_t – усиление антенны передатчика.

Отметим, что часто можно встретить несколько измененные формы записи уравнения Фрииса. Например, в [10] приведена следующая форма записи этого уравнения:

$$P_r = G_t P_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3)$$

где G_r – усиление антенны приемника; d – расстояние между передатчиком и приемником; λ – длина волны сигнала.

Изложим основы предлагаемого экстремального метода локализации излучателя шумового сигнала с помощью неподвижных, перестраиваемых сенсоров, работающих в режиме пассивного приема. На рис. 1 приведено графическое отображение беспроводной экстремальной системы локализации. Суть предлагаемого метода заключается в поиске такой оптимальной взаимосвязи между показателями R и A_e , при которой специально формируемый функционал цели достигает экстремальной величины.

Отметим, что для локализации в системе осуществляется управление эффективной площадью апертуры приемной антенны. Формально этот метод в зависимости от расстояния между приемной и передающей антеннами может быть изложен следующим образом.

Допускаем наличие двух упорядоченных множеств

$$R = \{R_i\}; i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

$$A = \{A_{ej}\}; j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Также допускаем наличие варьируемой дискретной функциональной зависимости

$$R_i = f(A_{ej}), \quad (6)$$

а также непрерывного модельного аналога функции (6) в виде

$$R = f(A_e). \quad (7)$$

Принимаем, что на функцию (7) может быть наложено следующее ограничительное условие

$$\int_0^{A_{e \max}} f(A_e) = C_1, \quad (8)$$

где $C_1 = \text{const}$.

Математический смысл ограничительного условия (8) заключается в сужении класса функций, подлежащих к использованию при управлении

величиной эффективной площадью апертуры приемной антенны в зависимости от расстояния R .

Эффект ограничения возможности выбора функции $f(A)$ геометрически интерпретирован на рис. 2, на котором представлены восемь разновидностей кусочно-непрерывных функций, удовлетворяющих условию (8).

Отметим, что ограничительное условие (8) применительно к дискретному аналогу этого выражения имеет очевидный геометрический смысл, заключающийся в постоянстве суммы всех R_i , вне зависимости от выбора вида функции $R = f(A_e)$.

Далее для исследования экстремального свойства предлагаемого метода локализации воспользуемся формулой (2), которую с учетом (4) изменим следующим образом:

$$P_{r\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{G_t P_t A_{ei}}{4\pi R(A_i)^2}. \quad (9)$$

Также, условно приняв показатели A_e и R качестве непрерывных величин, выражение (9) можно заменить определенным интегралом:

$$P_{r.ин} = \int_{A_{e \min}}^{A_{e \max}} \frac{G_t P_t A_e}{4\pi R(A_e)^2} dA_e. \quad (10)$$

Заметим, что обратный переход от формул (8) и (10) в дискретные суммы всегда может быть осуществлен методом трапеций Симпсона.

Таким образом, имея выражения (8) и (10), можно составить задачу безусловной вариационной оптимизации, в которой полный функционал оптимизации выражается как

$$F = \int_{A_{e \min}}^{A_{e \max}} \frac{G_t P_t A_e}{4\pi R(A_e)^2} dA_e + \gamma \left[\int_{A_{e \min}}^{A_{e \max}} R(A_e) dA_e - C \right], \quad (11)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи (10) (допускаем $A_{\min} = 0$) получено в виде

$$R(A_e) = C_1 \sqrt[3]{\frac{A_e}{A_{e \max}}}, \quad (12)$$

где $C_1 = \text{const}$.

Можно показать, что при выполнении условия (12) F достигает минимальной величины.

Таким образом, с учетом вышеизложенного можно предложить следующий алгоритм реализации предлагаемого метода экстремальной локализации:

1. Выбирается область изменения показателя A_e , в которой функция $R(A_e)$ может быть линеаризована.
2. Осуществляется ротация A_e по сенсорам x_i .
3. Ротация приостанавливается при достижении условия $F = \min$.

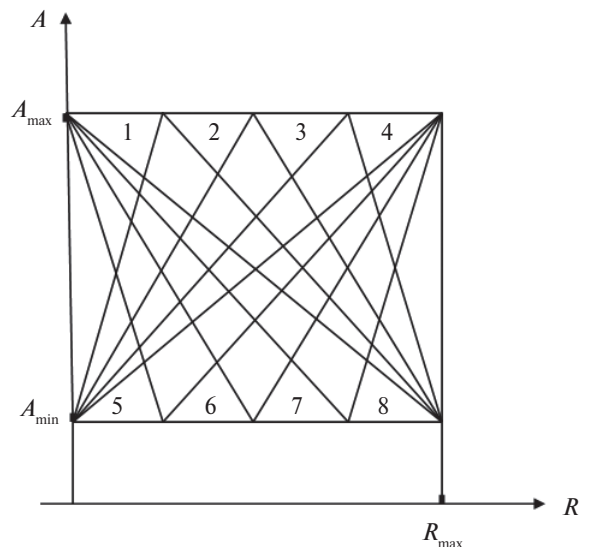


Рисунок 2. Геометрическая интерпретация сужения класса функций $R = f(A_e)$
Figure 2. Geometric interpretation of the functions class narrowing $R = f(A_e)$

4. С помощью выражения (12) определяются значения дистанций R_i между источниками x_0 и x_i ; $i = \overline{1, n}$.
5. С помощью геометрического метода окружностей определяется позиция искомого источника x .

Метод решения задачи локализации с учетом энергопотерь на дистанциях

Энергетические потери на дистанциях выражаются в виде отношения мощности исходного переданного сигнала к мощности этого же сигнала, принятого на входе приемника. Этот показатель является функцией пройденной дистанции. Если рассматривается случай отсутствия атмосферного ослабления и эффекта многопутности, а также наличие прямого пути между передатчиком и приемниками распределенной сети, то между исходно переданной мощностью сигнала P_t и принятой мощностью этого же сигнала на приемнике P_r будет существовать взаимосвязь (3).

Целями исследования в данном разделе являются:

1. Построение новой модели распределенных сетей, предназначенных для локализации генератора шумового сигнала.
2. Оптимизация созданной модели и синтез оптимального режима функционирования сети.

Рассмотрим модель (3) в распределенной информационной сети локализации генератора шумов (рис. 3).

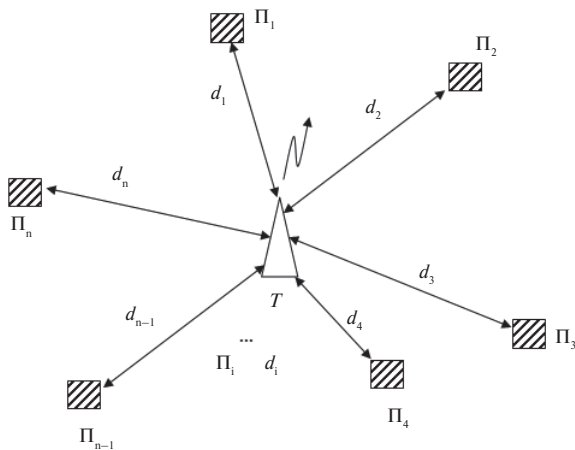


Рисунок 3. Схематическое представление распределенной информационной сети локализации источника шумовых сигналов: $d_i; i = \overline{1, n}$ – расстояния между передатчиком T и приемниками $\Pi_i; i = \overline{1, n}$

Figure 3. Schematic representation of a distributed information network for localizing a noise signal source: $d_i; i = \overline{1, n}$ – distance between the T transmitter and receivers $\Pi_i; i = \overline{1, n}$

Считаем, что генератор передатчика генерирует шумовые сигналы в диапазоне длин волн $\lambda_1 \div \lambda_n$, при этом сигналы длин волн $\lambda_i, i = \overline{1, n}$ имеют равную мощность. Используемые приемники $\Pi_i; i = \overline{1, n}$ способны принять сигналы любой длины волны λ_i .

Ставится вопрос определения такой функциональной взаимосвязи между показателями d_i и λ_i , при которой сумма сигналов, принятых всеми приемниками, достигла бы экстремальной величины. Физический смысл вводимой функции $d(\lambda)$ состоит в следующем. Рассматривается случай, когда в сети как генератор шума, так и приемники сети неподвижны, т.е. расстояния d_i неизменны. Однако всегда имеется возможность варьировать λ_i . Следовательно, имеет смысл осуществить поиск такой функции $d(\lambda)$, при которой сумма сигналов, принимаемых приемниками сети, достигла бы экстремума.

Целевой функционал в данном случае с учетом (3) определим, как

$$F_1 = \int_0^{\lambda_m} P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 d\lambda, \quad (13)$$

где λ_m – максимальное значение λ .

Функционал (13) сформирован следующим образом.

1. Осуществлен условный переход от дискретной модели

$$F_{1g} = \sum_{i=1}^{i=n} P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_i}{4\pi d} \right)^2 \quad (14)$$

к непрерывной модели (13).

2. Нижний предел интегрирования принят равным нулю.
3. Введена на рассмотрение функция $d=d(\lambda)$, оптимальный вид которой предстоит определить.

Для решения указанной задачи сформируем следующее ограничительное условие, налагаемое на функцию $d=d(\lambda)$.

$$\int_0^{\lambda_m} d(\lambda) d\lambda = C_2, \quad (15)$$

где $C_2 = \text{const}$.

Физический смысл условия (15) заключается в том, что любая ротация l по d не приводит к изменению величины C_2 при условии использования всех длин волн в приемниках в течение одного цикла локализации.

Таким образом с учетом выражений (13) и (15) можно составить целевой функционал безусловной вариационной оптимизации

$$F_0 = \int_0^{\lambda_m} P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 d\lambda + \gamma \left[\int_0^{\lambda_m} d(\lambda) d\lambda - C_2 \right], \quad (16)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи с учетом условий уравнения Эйлера позволило получить следующий вид оптимальной функции $d(\lambda)$:

$$d(\lambda) = \sqrt[3]{\frac{3C_2\lambda}{4}}. \quad (17)$$

Таким образом при условии (17) целевой функционал (16) достигает экстремума. Легко определить, что этот экстремум является минимумом, так как вторая производная интегранта функционала (16) по $d(\lambda)$ имеет положительный знак.

На основании вышеизложенного можно предложить следующий алгоритм технической реализации предлагаемого метода экстремальной локализации передатчика шумообразного сигнала T.

1. Определяется исходное распределение элементов множества $\{\lambda_i\}; i = \overline{1, n}$ по приемникам $\Pi_i; i = \overline{1, n}$.
2. Вычисляется сила суммарного выходного сигнала всех приемников.
3. Осуществляется ротация элементов множества $\{\lambda_i\}; i = \overline{1, n}$ по приемникам $\Pi_i; i = \overline{1, n}$. Последовательно решается задача перебора вариантов размещения элементов λ_i в приемниках $\Pi_i; i = \overline{1, n}$. При этом регистрируется суммарный выходной сигнал всех приемников.
4. При достижении минимума суммарным выходным сигналом всех приемников фиксируется функция

$$d = d(\lambda),$$

при реализации которой был зафиксирован минимум.

5. С учетом факта жесткой привязки λ_i к определенному приемнику Π_i в текущем подцикле определяется расстояние между указанным Π_i и передатчиком.
6. После определения как минимум трех расстояний от передатчика до приемников осуществляется геометрическое определение местонахождения передатчика.

Выводы

Предлагаемый принцип экстремальной локализации позволяет выполнить локализацию генератора шумового сигнала, используя перестраиваемые

сенсоры или осуществив специальный подбор длин принимаемых волн. В первом случае для локализации источника шума, формулируется и решается задача определения оптимальной взаимосвязи между эффективной площадью апертуры антенн приемных узлов и расстоянием соответствующего узла и генератора шума, при которой функционал цели достигает экстремума. Во втором случае для локализации формулируется и решается задача определения оптимальной взаимосвязи между длиной волны шумового сигнала и вышеуказанным расстоянием. Дано математическое обоснование соответствующих методов локализации источника шумов. Изложены алгоритмы реализации предложенных методов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Paul A. K., Sato T. Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey on Algorithms, Measurement Techniques, Applications and Challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2017, vol. 6, iss. 4, pp. 2–24.
2. Wang C., Xiao L. Sensor Localization in Concave Environments. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2008, vol. 4, no. 1, DOI:10.1145/1325651.1325654.
3. Ijaz F., Yang H. K., Ahmad A. W., Lee C. Indoor positioning systems. In: *Proceedings of the 15th International conference on advanced communications technology (ICACT)*, Pyeong Chang, Korea, 27–30 January 2013, pp.1146–1150
4. Yassin A., Nasser Y., Awad M., Al-Dubai A.; Liu R, Yuen C, Raulefs R., Aboutanios E. Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, iss. 2, pp. 1327–1346. DOI: 10.1109/COMST.2016.2632427.
5. Adalja D. M. A comparative analysis on indoor positioning techniques and systems. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp.1790–1796.
6. Al-Ammar M. A., Alhadrami S, Al-Salman A., Alarifi A., Al-Khalifa H. S., Alnafessah A., Alsaleh M. Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms. In: *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds*, Santander, Spain, 6–8 October 2014, pp. 245–252.
7. Асадов Х.Г., Абдулаев Н.А., Абдулов Р.Н. Метод окружностей для локализации мест технологических взрывов на основе регистрации акустических волн в приземной атмосфере // *Авиакосмическое приборостроение*. 2009. № 12. С. 25–27.
8. Асадов Х.Г., Мамедов Ш.Х. Метод информационной локации для предсказания эпицентра ожидаемого землетрясения. Прямая и обратная задачи предсказания // *Информационные технологии*. 2004. № 11. С. 43–47.
9. Lindmark L., Höggren A. Methods for locating signal Jammers with a UAV. Department of Science and Technology Linköping University SE-601 74 Norrköping, Sweden, 2018, 50 p.
10. Naseem Z., Naushen I., Mirza Z. Propagation models for wireless communication system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, iss. 1, 2018, pp. 237–245.

REFERENCES

1. Paul A. K., Sato T. Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey on Algorithms, Measurement Techniques, Applications and Challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2017, vol. 6, iss. 4, pp. 2–24.
2. Wang C., Xiao L. Sensor Localization in Concave Environments. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2008, vol. 4, no. 1, DOI:10.1145/1325651.1325654.
3. Ijaz F., Yang H. K., Ahmad A. W., Lee C. Indoor positioning systems. In: *Proceedings of the 15th International conference on advanced communications technology (ICACT)*, Pyeong Chang, Korea, 27–30 January 2013, pp.1146–1150
4. Yassin A., Nasser Y., Awad M., Al-Dubai A.; Liu R, Yuen C, Raulefs R., Aboutanios E. Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, iss. 2, pp. 1327–1346. DOI: 10.1109/COMST.2016.2632427.
5. Adalja D. M. A comparative analysis on indoor positioning techniques and systems. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp.1790–1796.
6. Al-Ammar M. A., Alhadrami S, Al-Salman A., Alarifi A., Al-Khalifa H. S., Alnafessah A., Alsaleh M. Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms. In: *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds*, Santander, Spain, 6–8 October 2014, pp. 245–252.
7. Asadov Kh. G., Abdulaev N. A., Abdulov R. N. The method of circles for localization of places of technological explosions on the basis of registration of acoustic waves at the on-earth atmosphere. *Aviakosmicheskoe priobrostroenie*, 2009, no. 12, pp. 25–27.
8. Asadov Kh. G., Mamedov Sh. Kh. Information location method for predicting the epicenter of an expected earthquake. Direct and inverse prediction problems. *Informatsionnye tekhnologii*, 2004, no. 11, pp. 43–47

9. Lindmark L., Höggren A. *Methods for locating signal Jammers with a UAV*. Department of Science and Technology Linköping University SE-601 74 Norrköping, Sweden, 2018, 50 p.
10. Naseem Z., Nausheen I., Mirza Z. Propagation models for wireless communication system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, iss. 1, 2018, pp. 237–245.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Джавадов Натиг Гаджи оглы, д. т. н., профессор, генеральный директор, Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, Азербайджанская Республика, AZ1115, г. Баку, улица С.С. Ахундова, 1, тел.: +994 (12) 510-63-47, e-mail: javadovng@mail.ru.

Асадов Хикмет Гамидович, д. т. н., профессор, начальник отдела, НИИ Аэрокосмической информатики, Азербайджанская Республика, AZ1115, г. Баку, улица С.С. Ахундова, 1, тел.: + 994 (50) 324-72-40, e-mail: asadzade@rambler.ru.

Казымлы Рейхана Вагиф гызы, докторант, Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, Азербайджанская Республика, AZ1115, г. Баку, улица С.С. Ахундова, 1, тел.: +994 (12) 510-63-47, e-mail: reyhana@rambler.ru.

AUTHORS

Natig G. Dzavadov, D.Sc. (Engineering), professor, CEO, Azerbaijan National Aerospace Agency, 1, ulitsa S. S. Akhundova, Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic, tel.: +994 (12) 510-63-47, e-mail: javadovng@mail.ru.

Khikmet G. Asadov, D.Sc. (Engineering), professor, head of department, Research Institute of Aerospace Informatics, 9, S. S. Akhundov street, Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic, tel.: + 994 (50) 324-72-40, e-mail: asadzade@rambler.ru.

Reikhana V. Kazymly, Ph.D. student, Azerbaijan National Aerospace Agency, 9, S. S. Akhundov street, Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic, tel.: +994 (12) 510-63-47, e-mail: reyhana@rambler.ru.

Поступила 25.10.2019; принята к публикации 19.03.2020; опубликована онлайн 03.06.2020.
Submitted 25.10.2019; revised 19.03.2020; published online 03.06.2020.