

УДК 04.93: 621.313

Г. Х. М. Аль-Джасри

СИНТЕЗ ГЕОМЕТРИИ СЕНСОРНОЙ СЕТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕЧЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Аннотация. Исследован вопрос влияния геометрии акустической сенсорной сети (АСС) с технологией TDOA на потенциальную точность оценивания координат источника звука. Задача выбора геометрии АСС решена для построения системы акустического мониторинга течей теплоносителя в энергетическом оборудовании. Для синтеза алгоритма размещения акустических сенсоров в доступных точках технологического помещения применен геометрический фактор потери точности (GDOP). Разработанный метод синтеза геометрии АСС позволяет получить гарантированную потенциальную точность оценивания координат течи.

Ключевые слова: течь теплоносителя, акустическая сенсорная сеть, оценивание координат источника, потенциальная точность

G. Kh. M. Al-Jasri

THE SYNTHESIS OF SENSOR NETWORK GEOMETRY FOR ACOUSTIC HEAT TRASFER LEAK DIAGNOSTICS

Abstract. The question of the influence of the acoustic sensor network (ASN) with TDOA technology on the potential accuracy of sound source coordinates estimation has been studied. The problem of choice ACC geometry resolved to build an acoustic system for heat transfer leak monitoring in the energy equipment. A special feature of this problem is the possibility to placing acoustic sensors only in available for this point of technological enclosure. The geometric dilution of precision (GDOP) is selected as a measure for the potential estimation accuracy of the sound source coordinates estimation. It is shown that the direct calculation of GDOP is computationally challenging. It is proposed to use volumes of elementary tetrahedrons formed by each four sensors of network in the network geometry synthesis. These volumes are inversely proportional to the value of GDOP. Tetrahedron close to coplanar, have a volume close to zero, and should be excluded from the network geometry in the synthesis process. The multi-step method for ASN geometry synthesis allows to obtain the guaranteed value of GDOP controlled within a rectangular technological space. The method involves sequential sensors in the network with rejection ones which produce tetrahedrons being coplanar or nearly coplanar. It is shown that the method allows to obtain the value of GDOP no more than 4-6.

Keywords: heat transfer leak, acoustic sensor network, source coordinates estimation, potential accuracy

Г. Х. М. Аль-Джасри

СИНТЕЗ ГЕОМЕТРІЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЕЧІЙ ТЕПЛОНОСІЯ

Анотація. Досліджено питання впливу геометрії акустичної сенсорної мережі (АСМ) з технологією TDOA на потенційну точність оцінювання координат джерела звуку. Вирішено задачу вибору геометрії АСМ для побудови системи акустичного моніторингу течі теплоносія в енергетичному обладнанні. Для синтезу алгоритму розміщення акустичних сенсорів в доступних точках технологічного приміщення застосований геометричний фактор втрати точності (GDOP). Розроблений метод синтезу геометрії АСМ дозволяє отримати гарантовану потенційну точність оцінювання координат течі.

Ключові слова: течія теплоносія, акустична сенсорна мережа, оцінювання координат джерела, кооперативне детектування, потенційна точність

Введение. Автоматизированная диагностика течей теплоносителя в теплоэнергетическом оборудовании, работающем под давлением, всегда была и остается одной из важнейших эксплуатационных задач современной энергетики [1 – 2].

Среди многочисленных методов диагностики течей особое место занимают акустические методы, основанные на регистрации интенсивного акустического сигнала, который возникает в месте истечения перегрето-

го теплоносителя через дефект в металле.

При регистрации этого сигнала сенсорами, размещенными на металле оборудования, применяются методы контактного акустического поиска течей [3].

В последние годы получил широкое развитие бесконтактный акустический метод диагностики течей, основанный на регистрации акустического сигнала от течи в воздушной среде технологического помещения разнесенной в пространстве системой акустических сенсоров (микрофонов) [4 – 6].

© Аль Джасри Г.Х.М., 2016

Такие системы будем называть акустической сенсорной сетью (АСС).

Задачами акустической бесконтактной диагностики течей являются обнаружение сигнала от течи и ее локализация (оценивание координат течи). При локализации течей особенно популярным является метод оценивания, основанный на оценивании разностей времен прихода сигнала на пространственно разнесенные сенсоры (технология TDOA) [7 – 8]. В АСС с обработкой информации по технологии TDOA точность локализации течи (источника звука) зависит от числа сенсоров и геометрии их размещения.

В работе [9] показано, что максимальная точность локализации течи достигается при расположении сенсоров в вершинах правильных многогранников (так называемых платонических фигур), например, тетраэдра, октаэдра, куба.

При проектировании реальных систем диагностики с АСС расположение сенсоров практически определяется технологическими соображениями: не в каждой точке технологического помещения можно расположить микрофон и обеспечить канал связи с ним.

Целью данной работы является синтез геометрии размещения АСС в технологическом помещении в точках, доступных по технологическим соображениям, обеспечивающей гарантированную потенциальную точность определения координат источника звука.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- сформулирована задача TDOA оценивания координат с помощью АСС;
- исследован геометрический фактор потери точности в TDOA системах;
- разработан алгоритм синтеза геометрии АСС на множестве технологически возможных точек, обеспечивающий гарантированную потенциальную точность локализации течи.

Основная часть

1. Формулировка TDOA-задачи для АСС.

Сформулируем TDOA-задачу в общем виде [10]. Пусть АСС состоит из M сенсоров, расположенных в точках $\mathbf{r}_i \in \mathcal{R}^D$,

$i = 1, \dots, M, D = 2, 3$. Источник расположен в точке $\mathbf{s} \in \mathcal{R}^D$. Расстояние между источником звука и приемником i обозначим

$$d_i(\mathbf{s}) = \|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\|, \quad (1)$$

где $\|\dots\|$ – символ евклидова расстояния. Разность расстояний сенсоров i и j от источника составляет

$$d_{ij}(\mathbf{s}) = d_i(\mathbf{s}) - d_j(\mathbf{s}). \quad (2)$$

Тогда $\tau_{ij} = \frac{d_{ij}(\mathbf{s})}{c} + n_{ij}$, есть разность времен прихода (*англ.* TDOA – time difference of arrival) сигнала от источника на пару сенсоров i и j , здесь c – скорость звука, n_{ij} – ошибка оценивания TDOA. Пусть I – множество, состоящее из N пар сенсоров (i, j) , оценки TDOA которых используются для оценивания координат источника \mathbf{s} .

Введем векторы размерности $N \times 1$:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{ij} \\ \vdots \\ \tau_{ij} \end{bmatrix}_{i,j \in I}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_{ij} \\ \vdots \\ d_{ij} \end{bmatrix}_{i,j \in I}, \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_{ij} \\ \vdots \\ n_{ij} \end{bmatrix}_{i,j \in I}. \quad (3)$$

В целом модель акустического сигнала на пространственно распределенной в пространстве сенсорной сети выглядит как

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{\mathbf{d}(\mathbf{s})}{c} + \mathbf{n}. \quad (4)$$

Задача оценивания координат источника звука заключается в определении вектора координат источника \mathbf{s} при известных $\{\mathbf{r}_i\}, \boldsymbol{\tau}, c$. Многочисленные варианты решения задачи оценки \mathbf{s} рассмотрены например, в [7 – 8] и не являются предметом данного исследования. В [8] показано, что точность оценивания координат источника возрастает с увеличением числа сенсоров.

Для формирования множества сенсорных пар существует ряд способов:

1. Полное множество TDOA:

$$I_o = \{(i, j) : 1 \leq i < j \leq M\},$$

состоящее из $C_M^2 = M(M-1)/2$ пар сенсоров.

2. Сферическое множество TDOA

$$I_S = \{(1, k), \dots, (k-1, k), (k+1, k), \dots, (M, k)\},$$

содержащее $(M-1)$ пар сенсоров с общим «опорным» сенсором k , относительно которого оцениваются все TDOA. Это множество применяется в задачах оценивания с моделью сферической волны.

Другие варианты выбора множества сенсорных пар и информативность выбора сенсорных пар подробно рассматриваются в [11].

Обычно предполагается, что шумовой вектор \mathbf{n} в выражении (4) является гауссовой случайной величиной с нулевым средним и ковариационной матрицей $\sigma^2 \mathbf{I}$. В этом случае потенциальная точность оценивания вектора \mathbf{s} определяется нижней границей Крамера-Рао (Cramer-Rao Lower Bound, CRLB) [8]:

$$\sigma^2 \hat{\mathbf{s}}(\mathbf{s}) \geq \text{CRLB}_{\hat{\mathbf{s}}}(\mathbf{s}). \quad (5)$$

CRLB определяется как обратная информационная матрица Фишера:

$$\mathbf{J}^{-1} = (c\sigma)^2 (\mathbf{G}\mathbf{G}^T)^{-1}, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_{ij} \dots]_{i,j \in I}, \mathbf{g}_{ij} = \mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j, \mathbf{g}_i = \frac{\mathbf{s} - \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\|}, \quad (7)$$

\mathbf{g}_i – единичный вектор, соединяющий точки i -го сенсора и источника;

\mathbf{G} – геометрическая матрица задачи размера $D \times N$, содержащая в столбцах разностные векторы \mathbf{g}_{ij} .

В качестве меры точности оценивания координат источника также можно использовать след матрицы Фишера

$$\text{trace}[\mathbf{J}^{-1}] = (c\tau)^2 \text{trace}[\mathbf{G}\mathbf{G}^T]^{-1}, \quad (8)$$

здесь $\text{trace}[\dots]$ – символ следа матрицы.

Из последнего выражения видно, что на точность оценивания координат источника влияет не только дисперсия оценивания TDOA, но и геометрия АСС. В частности, выражение

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}[\mathbf{G}\mathbf{G}^T]^{-1}}, \quad (9)$$

называется в русскоязычной литературе геометрическим фактором потери точности или просто геометрическим фактором, а в англоязычной – GDOP. Далее будем пользоваться этим обозначением. GDOP может принимать значения от 0 до ∞ в зависимости от геометрии расположения сенсоров. В таблице 1 [10] приведены типичные значения GDOP. Далее мы будем ориентироваться на значения $GDOP=(4-6)$, что согласно таблице 1 соответствует «хорошей точности» оценивания координат.

1. Типичные значения GDOP

Значение GDOP	Точность
≤ 1	Идеальная
2-3	Отличная
4-6	Хорошая
7-8	Средняя
9-20	Ниже средней
21-50	Плохая

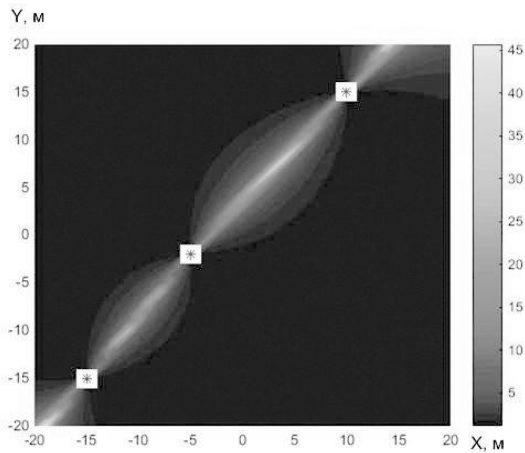
На рис. 1 показаны проекции на плоскость (XOY) величины GDOP для АСС из 4-х сенсоров для различной геометрии их взаимного расположения, рассчитанные по формуле (9).

Вычисления по выражению (9) включают в себя обращение и умножения матриц поэтому вычислительная сложность расчетов стремительно возрастает с увеличением размерности задачи. Метод решения задачи полным перебором всех возможных положений сенсоров требует нереальных вычислительных затрат.

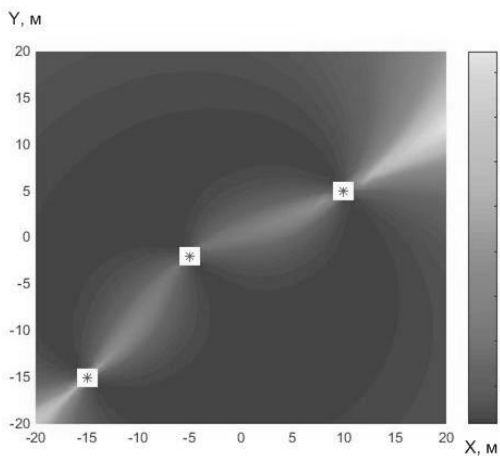
Рассмотрим другой подход к оценке GDOP, основанный на анализе геометрии элементарных тетраэдров, на которые может быть разбита АСС.

2. Анализ GDOP для элементарного тетраэдра

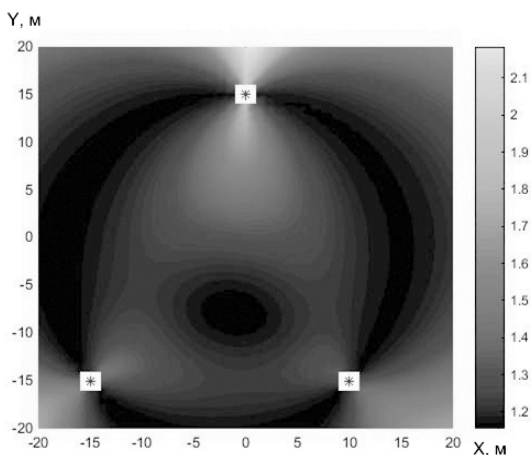
Рассмотрим задачу оценки GDOP для минимально возможного количества сенсоров. Для трехмерной геометрии ($D=3$) минимальное количество сенсоров равно четырем, т.е. сенсоры образуют пространственный тетраэдр.



а



б



в

Рис.1. Плоские проекции GDOP для системы из 4-х сенсоров:
 а – «очень плохая» геометрия; б – «плохая» геометрия; в – «хорошая» геометрия б координаты 4-го сенсора (0.0.10) м

Преобразуем выражение (9) таким образом:

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}[\mathbf{G}\mathbf{G}^T]^{-1}} = \sqrt{\frac{\text{trace}[\mathbf{G}\mathbf{G}^T]^*}{|\mathbf{G}|^2}} = \frac{\sqrt{\text{trace}\{\mathbf{G}\mathbf{G}^T\}^*}}{|\mathbf{G}|}. \quad (10)$$

Обозначим

$$B = \sqrt{\text{trace}\{\mathbf{G}^T\mathbf{G}\}^*}. \quad (11)$$

Тогда

$$GDOP = \frac{B}{|\mathbf{G}|}. \quad (12)$$

Соотношение между объемом тетраэдра и определителем геометрической матрицы $|\mathbf{G}|$ приведено в [14]

$$V = \frac{1}{6} \cdot |\mathbf{G}|. \quad (13)$$

Окончательно имеем

$$GDOP = \frac{1}{6} \cdot \frac{B}{V}. \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет сформулировать важный результат: для каждого элементарного тетраэдра, образованного сенсорами, величина GDOP обратно пропорциональна его объему. Поэтому при формировании конфигурации АСС необходимо стремиться к максимизации объемов всех тетраэдров, составляющих сеть. Объем тетраэдра с координатами вершин, расположенными в точках $(x_i, y_i, z_i), (i = 1, 2, 3, 4)$ (рис. 2) выражается через определитель

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Равенство нулю определителя является необходимым и достаточным условием компланарности вершин тетраэдра. При формировании геометрии сети необходимо исключить компланарные или «близкие к компланарным» тетраэдры, т.е. те тетраэдры, для которых определитель в выражении (15) близок к нулю или равен нулю.

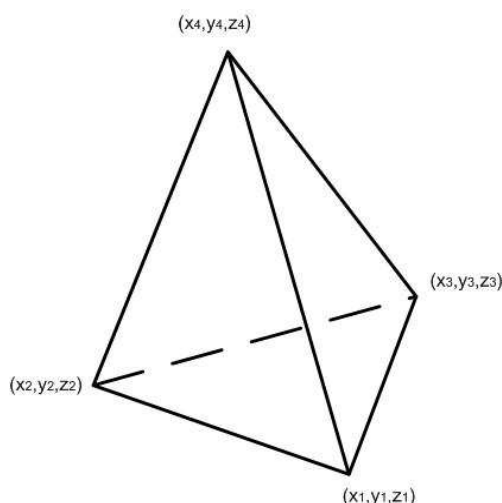


Рис. 2. Геометрия элементарного тетраэдра

В работе [13] показано, что в максимальный объем тетраэдра, который можно вписать в параллелепипед со сторонами a, b, c равен $V_{abc}^{\max} = abc/3$. При этом вершины тетраэдра располагаются в вершинах непересекающихся диагоналей двух противоположных граней параллелепипеда. Поэтому в дальнейшем для оценки «близости тетраэдров к компланарным» будем сравнивать их объем с V_{abc}^{\max} .

3. Метод синтеза геометрии АСС с гарантированным GDOP

На основании изложенного сформулируем метод синтеза геометрии АСС с гарантированным GDOP.

Шаг 0. Сформируем множество точек, технологически доступных в прямоугольном помещении размерами a, b, c для размещения в них сенсоров PS , число таких точек равно L , для каждой точки известны ее координаты $(x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, L$. Требуется найти подмножество точек PS_GDOP , размещение сенсоров в которых гарантирует требуемую величину GDOP. Инициализируем PS_GDOP как пустое множество: $\{PS_GDOP\} = \emptyset$.

Шаг 1. Первый возможный тетраэдр сформируем из максимально удаленных друг от друга точек множества. Для этого построим минимальную выпуклую оболочку (МВО) множества по алгоритму Джарвиса (Jarvis march) [14] $CONV_PS$ и найдем ее диаметр

$$\begin{aligned} diam (CONV_PS) &= \\ &= \max_{CONV_PS} (d_{ij}), i, j \in CONV_PS, i \neq j . \end{aligned}$$

Точки, являющиеся концами диаметра, p_1, p_2 исключим из множества S и включим в множество PS_GDOP :

$$\begin{aligned} \{PS\} &= \{PS\} - p_1, p_2, \\ \{PS_GDOP\} &= \{PS_GDOP\} + p_1, p_2 . \end{aligned}$$

Повторим процедуру построения диаметра $CONV_PS$

$$\begin{aligned} 2: diam (CONV_PS) &= \\ &= \max_{CONV_PS} (d_{ij}), i, j \in CONV_PS, i \neq j \end{aligned}$$

и найдем его конечные точки p_3, p_4 . Выполним операции

$$\begin{aligned} \{PS\} &= \{PS\} - p_3, p_4, \\ \{PS_GDOP\} &= \{PS_GDOP\} + p_3, p_4 . \end{aligned}$$

Очевидно, что точки p_1, p_2, p_3, p_4 будут вершинами тетраэдра, построенного из точек PS , максимально возможного объема. Далее объемы всех формируемых тетраэдров будем проверять на свойство «близости к компланарности» путем сравнения их объемов с пороговым значением $ThreshV = 0,1V_{abc}^{\max}$ (величина 0,1 подобрана экспериментальным путем для гарантированных значений GDOP=4-6).

Шаг 2. Последовательно включаем точки из PS в PS_GDOP .

$$i = 1. PS_GDOP = PS_GDOP + PS(i).$$

Формируем $M = C_{Card(M)}^4$ всех возможных тетраэдров в PS_GDOP , рассчитываем их объемы по соотношению (13) $V_j, j = 1, \dots, Card(M)$ и сравниваем их с пороговым значением $ThreshV$. Если для всех $j = 1, \dots, Card(M)$ выполняется соотношение $V_j \geq ThreshV$, точка $PS(i)$ включается в множество PS_GDOP и исключается из множества PS_GDOP . В противном случае точка $PS(i)$ рассматривается как непригодная для размещения сенсора и отбрасывается.

Шаг 3. Если $Card(PS) = 0$, т.е. $\{PS\} = \emptyset$, процедура заканчивается. В противном случае $i = i + 1$ и переход на шаг 3.

Проиллюстрируем предложенный метод на конкретном примере. Промоделирована задача размещения сенсоров в 24-х возможных точках прямоугольного помещения размерами 12*15*10 м. В качестве точек, доступных для размещения сенсоров, взяты 24 точки, со случайными координатами, равномерно распределенными в пределах помещения. На рис.3 приведена конфигурация сети и МВО, выделенная на первом шаге метода.

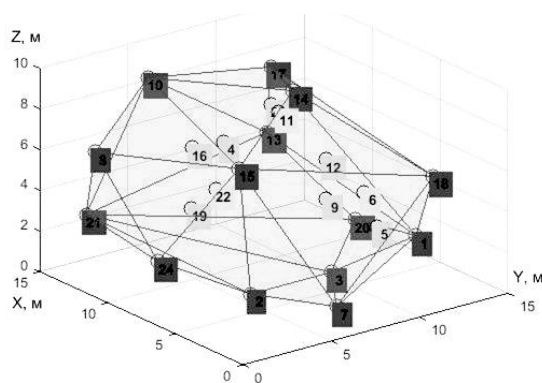


Рис. 3. Конфигурация АСС и МВО, выделенная на первом шаге метода синтеза.

Результаты моделирования показывают, что предложенный метод обеспечивает гарантированную потенциальную точность оценивания координат источника звука.

Выводы и направления дальнейших исследований. В результате исследования на основе понятия GDOP сформулирован метод синтеза геометрии АСС, обеспечивающий гарантированную потенциальную точность оценивания координат течи.

В качестве направления дальнейших исследований укажем анализ влияния геометрии акустических систем диагностики на точность оценки координат течи в помещениях сложной формы.

Список использованной литературы

1. Полобюк Т. А. Анализ методов обнаружения утечек жидкости в трубопроводах теплоэнергетических установок [Текст]/ Т. А. Полобюк // *Метрологія та вимірювальна техніка* (Метрологія – 2014). Наукові праці конференції. – Харків : – 2014. – С. 442 – 445.

2. Беляев С. А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС [Текст] / С. А.

Беляев, В. В. Литвак, С. С. Солод. – Томск : Изд-во НТЛ, 2008. – 218 с.

3. Дробот Ю. Б. Акустическое контактное течеискание [Текст] / Ю. Б. Дробот, В. А. Грешников, В. Н. Бачегов. – М. : Машиностроение, 1989. 120 с.

4. Болтенков В. А. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя [Текст] / В. А. Болтенков, Г. Х. М. Аль-Джасри // *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво.* – Луцьк : – 2015. – Вып. 20. – С. 16 – 22.

5. Geiger G., (2006), State-of-the-Art in Leak Detection and Localization [Text], *Oil and Gas European Magazine*, Hamburg, Germany, No. 4, pp. 193 – 198.

6. Shahul S.H., D. Najumnissa Jamal, and Murshitha Shajahan, (2013), Automatic Detection and Analysis of Boiler Tube Leakage System [Text], *International Journal of Computer Applications*, Delhi, India, Vol. 84, No. 16, pp. 19 – 23.

7. Brandstein M., and Ward D., (2001), *Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications* [Text], Berlin, Germany, Springer-Verlag, 398 p.

8. Benesty J., Chen J., and Jingdong Y. Huang, (2008), *Microphone Array Signal Processing* [Text], Berlin, Germany, Springer, 240 p.

9. Mantilla Gaviria I.A., (2013), New Strategies to Improve Multilateration Systems in the Air Traffic Control, [Text], Barsezona, Spaine, *Editorial Universitat Politècnica de València*, 286 p.

10. Yang B.A., and Scheuing J., (2006), Theoretical Analysis of 2D Sensor Arrays for TDOA Based Localization [Text], *IEEE International Conference ICASSP'2006*, Toulouse, France, Vol. 4, pp. 901 – 904.

11. Абакумов А. Н. Исследование влияния геометрической конфигурации разностно-дальномерной системы на точность определения местоположения абонентских терминалов спутниковых систем связи [Текст] / А. Н. Абакумов, С. С. Семенюк // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – СПб. : ВКА имени А.Ф. Можайского. – Вып. 644. – 2014. – С. 40 – 50.

12. Tian A., Fu C., and Don D., (2014), The Research of Satellite Selection Algorithm in Positioning System [Text], *The Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems*,

Springer International Publishing Switzerland, pp. 997 – 1003.

13. Шеломовский В. В. Экстремумы [Текст] / В. В. Шеломовский. – Мурманск : МГПУ, Физматкнига, 2005. – 160 с.

14. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++ [Текст] / М. Ласло. – М. : БИНОМ, 1997. – 304 с.

Получено 08.06.2016

References

1. Polobyuk T.A. Analiz metodov obnaruzheniya utechek zhidkosti v truboprovodah teploenergeticheskikh ustanovok [Analysis of Methods of Liquid leak Detection Methods in the thermal Power Plants Pipes], (2014), *Metrologiya ta Vimsryuvalna Tehnika (Metrologiya – 2014), Naukovi Pratsi Konferentsiyi*, Kharkiv, Ukraine, pp. 16 – 22 (In Ukrainian, Russian).

2. Belyaev S.A., Litvak V.V., and Solod S.S. Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniya TES [The Reliability of heat and Power CHP Equipment], (2008), Tomsk, Russian Federation, *NTL Publishing*, 218 p. (In Russian).

3. Drobot Yu.B., Greshnikov V.A., and Bachegov V.N. Akusticheskoe kontaktnoe techeiskanie [Acoustic leak Detection], (1989), Moscow, Russian Federation, *Mashinostroenie*, 120 p. (In Russian).

4. Boltenev V.A., Al-Jasri G.H.M. Issledovanie akusticheskikh sistem monitoringa techey teplonosatelya [The study of Acoustic heat Trasfer leak Monitoring Systems], (2015), *Komp'yuterno-integrovani Tehnologiyi: osvita, nauka, virobnitstvo*, Lutsk, Ukraine, Vol.20, pp. 16 –22 (In Russian).

5. Geiger G., (2006), State-of-the-Art in Leak Detection and Localization *Oil and Gas, European Magazine*, Vol. 4, pp. 193 – 198.

6. Shahul S.H., Najumnissa D.J., and Murshitha S., (2013), Automatic Detection and Analysis of Boiler Tube Leakage System, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 84, No. 16, pp. 19 – 23.

7. Brandstein M., and Ward D., (2001), Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications, Berlin, Germany, *Springer-Verlag*, 398 p.

8. Benesty J., Chen J., and Jingdong, Huang Y., (2008), Microphone Array Signal Processing, Berlin, Germany, *Springer*, 240 p.

9. Mantilla Gaviria I.A. New Strategies to Improve Multilateration Systems in the Air Traffic Control [Tesis Doctoral], (2008). Barselona, Spaine, *Editorial Universitat Politècnica de València*, 286 p.

10. Yang B., and Scheuing J., (2006), A Theoretical Analysis of 2D Sensor Arrays for TDOA Based Localization, *International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings (ICASSP'2006)*, Vol. 4. Toulouse, France, *IEEE*, pp. 901 – 904.

11. Abakumov A.N., and Semenyuk S.S. Issledovanie vliyaniya geometricheskoy konfiguratsii raznostno-dalnomernoy sistemy na tochnost opredeleniya mestopolozheniya abonentskih terminalov sputnikovyih sistem svyazi [Study the Geometric Configuration of the Impact for the difference-distance-measuring System on the Accuracy of the Definition of userment Locations Channels of Satellite Communication Systems], (2014), *Trudy Voенно-Kosmicheskoy Akademii imeni A.F. Mozhayskogo*, Vol. 644, SPb, Russian Federation, pp. 40 – 50 (In Russian).

12. Tian A., Fu C., and Don D., (2014), The Research of Satellite Selection Algorithm in Positioning System, *The Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems, Springer International Publishing Switzerland*, pp. 997 – 1003.

13. Shelomovskiy V.V. Ekstremumy [Extremums], (2005), Murmansk, Russian Federation, *MGPU, Fizmatkniga*, 160 p. (In Russian).

14. Laslo M. Vyichislitel'naya geometriya i kompyuternaya grafika na C++ [Computational Geometry and Computer Graphics in C ++], (1997), Moscow, Russian Federation, *BINOM*, 304 p.



Аль-Джасри

Гамаль Халед
Мохаммед,
аспирант каф. Информационных систем
Одесского нац. политехн. ун-та,
тел.: (093) 511-14-46.
E-mail: aljasri@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6927-1624