

УДК 629.7

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_57

## НОВЫЙ ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ Артиллерийской звуковой разведки

### NEW EFFICIENT ALGORITHM FOR ARTILLERY SOUND RECONNAISSANCE

*Канд. физ.-мат. наук О.О. Барабанов, канд. физ.-мат. наук Л.П. Барабанова*

*Ph.D. O.O. Barabanov, Ph.D. L.P. Barabanova*

*Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева*

Представлен новый алгоритм артиллерийской звуковой разведки с одновременным вычислением скорости звука по показаниям четырех разнесенных звукоприемников. Постановка задачи осуществляется в плоских декартовых координатах, что приводит к разностно-дальномерной системе уравнений, как и в стандартном случае, который в западной терминологии обозначается аббревиатурой TDOA (time difference of arrival). Однако в отличие от стандартного случая число уравнений увеличивается на один и число неизвестных также увеличивается на один (это будет скорость звука, соответствующая акустической ситуации в непосредственный момент выстрела/взрыва). Предлагаемый алгоритм снабжен необходимым математическим анализом и серией компьютерных экспериментов. Когда все четыре звукоприемника находятся на одной прямой, алгоритм не работает. Для версии штатного алгоритма разработан прототип в среде MathCad.

**Ключевые слова:** алгоритм, звукоприемник, скорости звука, декартовы координаты, обратная разностно-дальномерная задача.

A new algorithm for artillery sound reconnaissance is presented with simultaneous calculation of the speed of sound based on the readings of four spaced apart sound receivers. The problem is formulated in flat Cartesian coordinates, which leads to a difference-rangefinder system of equations, as in the standard case, which in Western terminology is denoted by the abbreviation TDOA (time difference of arrival). However, unlike the standard case, the number of equations increases by one and the number of unknowns also increases by one (this will be the speed of sound corresponding to the acoustic situation at the immediate moment of the shot/explosion). The proposed algorithm is equipped with the necessary mathematical analysis and a series of computer experiments. When all four sound receivers are on the same straight line, the algorithm does not work. A prototype was developed for the version of the standard algorithm in the MathCad environment.

**Keywords:** algorithm, sound receiver, sound speed, Cartesian coordinates, inverse TDOA.

Как сказано в работе [1]: «Главная функция артиллерийской разведки состоит в своевременном обнаружении, опознавании и определении координат наземных целей с достаточной полнотой и точностью, позволяющей

огневым средствам артиллерии эффективно их поражать. При этом необходимо использовать данные всех имеющихся источников информации о целях». В этих тезисах содержится очень важная мысль о максимальном использовании

всех имеющихся источников информации. В артиллерийской разведке источниками информации являются данные от звукоприемников (ЗП) и таблицы поправок на направление ветра, силу ветра, на скорость звука и т.д. Однако основными источниками информации в артиллерийской разведке являются данные звукоприемников.

Известна классическая постановка задачи артиллерийской разведки в виде системы нескольких уравнений с участием временных промежутков звукового сигнала. В отечественной литературе эту постановку называют разностно-дальномерным методом или обратной разностно-дальномерной задачей (ОРДЗ) [2–6]. В зарубежной литературе эта постановка носит сокращение TDOA (time difference of arrival) [7–10].

Как работала упрощенная версия ОРДЗ — TDOA в годы Второй мировой войны, описано в рассказе [11].

Параллельно с технологиями звуковой артиллерийской разведки развивались технологии навигации и обнаружения в радиоэлектронной области, где место скорости звука заняла скорость света. В конечном итоге это привело к созданию GPS и ГЛОНАСС.

Неудивительно, что акустические и радиоэлектронные системы обнаружения подчиняются одним и тем же системам уравнений. В начале 90-х годов была сделана ошибочная оценка применения технологии ОРДЗ: «Большой объем математических действий делает и этот прием неприемлемым даже при использовании ЭВМ» [12, с. 98]. Прогресс в области вычислительной техники открыл новые перспективы как в спутниковой навигации, так и в звуковой артиллерийской разведке.

Исторические исследования показали, что с математической точки зрения упомянутые задачи имеют античный аналог и в этом качестве их решением занимались великие ученые: Аполлоний, Виет, Декарт, Ферма, Ньютон, Коши [6].

Интерес к разностно-дальномерной задаче (РДЗ) и ОРДЗ возобновился в конце XX века [4] и стал фактически переоткрытием алгебраического метода Декарта.

Новым в этом направлении после Декарта стал способ, в котором скорость сигнала была введена в число неизвестных расширенной (на единицу) системы уравнений [13, 14].

Применительно к артиллерийской звуковой разведке этот способ потребует четырех (вместо трех) разнесенных звукоприемников.

Во всех известных на данный момент способах артиллерийской разведки скорость звука определяется косвенным образом [2–4, 6–12, 15–18]. Очевидно, такой подход будет сопровождаться неконтролируемой ошибкой местоопределения выстрела/взрыва.

В настоящей работе приводится новый эффективный алгоритм артиллерийской звуковой разведки с 4-мя разнесенными звукоприемниками. На входе нового алгоритма, как и в классическом случае, находятся плоские декартовы координаты звукоприемников и моменты приема звукового сигнала синхронизированными звукоприемниками. На выходе нового алгоритма, как и в классическом случае, будут находиться плоские декартовы координаты источника выстрела/взрыва (ИЗ). Кроме того, в отличие от классического случая будет находиться эффективная скорость звука.

В настоящей работе скорость звука является измеряемой величиной, соответствующей акустической ситуации в непосредственный момент выстрела/взрыва.

## 1. Постановка задачи

Рассматривается плоский случай в системе декартовых координат  $\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ . Для осуществления предлагаемого способа, в отличие от известного способа, необходимы как минимум 4 разнесенных ЗП. Звукоприемник с номером  $j$  задается столбцом декартовых координат  $a_j = \begin{pmatrix} a_{j,1} \\ a_{j,2} \end{pmatrix}$ . Неизвестный столбец декартовых координат  $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$  звукоизлучателя, неизвестный момент  $\tau$  излучения (выстрела/разрыва) и неизвестная скорость сигнала  $c$  оказываются связаны 4 уравнениями

$$|x - a_j| = c \cdot (t_j - \tau) \quad j = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где  $|x - a_j| = \sqrt{(x_1 - a_{j,1})^2 + (x_2 - a_{j,2})^2}$  — расстояние от излучателя до ЗП с номером  $j$ ;

$a_j \in \mathbb{R}^2$  — известное местоположение  $j$ -го звукоприемника;

$t_j$  – момент приема звукового сигнала  $j$ -м звукоприемником. Требуется одновременно найти 4 неизвестных  $x_1, x_2, \tau, c$ , то есть решить систему (1) относительно этих четырех неизвестных.

## 2. Математический анализ задачи

Без ограничения общности положим

$$t_1 = \min\{t_j : j=1, \dots, 4\} = 0, \quad a_1 = \bar{0},$$

где  $\bar{0}$  — нулевой столбец. Тогда исходная система запишется в равносильном виде как

$$x^2 = c^2 \cdot \tau^2, \quad (2)$$

$$(x - a_j)^2 = c^2(\tau - t_j)^2, \quad j = 2, 3, 4, \quad (3)$$

$$\tau \leq 0, \quad (4)$$

где  $x^2 = x^T \cdot x = (x_1)^2 + (x_2)^2$  — скалярный квадрат;

$(\cdot)^T$  — операция транспонирования. Вычитая первое уравнение (2) из остальных уравнений (3), получим подсистему

$$2 \cdot a_j^T \cdot x - a_j^2 = 2 \cdot c^2 \cdot t_j \cdot \tau - c^2 \cdot t_j^2.$$

Введем новую систему 4-х неизвестных  $x_1, x_2, \theta, \kappa$ ,

$$\text{где } z = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta = c^2 \cdot \tau \end{pmatrix} \text{ и } \kappa = c^2.$$

Тогда в новых неизвестных исходная система (2), (3), (4) будет равносильна системе 4 уравнений

$$\kappa \cdot x^2 - \theta^2 = 0, \quad (5)$$

$$2 \cdot a_j^T \cdot x - 2 \cdot t_j \cdot \theta = a_j^2 - t_j^2 \cdot \kappa, \quad j = 2, 3, 4, \quad (6)$$

$$\theta \leq 0. \quad (7)$$

Система (6) в матричном виде получит вид

$$\mathbf{L} \cdot z = \mathbf{b} + \kappa \cdot \mathbf{h}, \quad (8)$$

где

$$\mathbf{L} = 2 \cdot \begin{pmatrix} a_{2,1} & a_{2,2} & -t_2 \\ a_{3,1} & a_{3,2} & -t_3 \\ a_{4,1} & a_{4,2} & -t_4 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} (a_{2,1})^2 + (a_{2,2})^2 \\ (a_{3,1})^2 + (a_{3,2})^2 \\ (a_{4,1})^2 + (a_{4,2})^2 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} -(t_2)^2 \\ -(t_3)^2 \\ -(t_4)^2 \end{pmatrix}.$$

Разрешая линейную относительно  $x, \theta$  подсистему (8), получим

$$z = K \cdot \mathbf{b} + \kappa \cdot K \cdot \mathbf{h},$$

где  $K = \mathbf{L}^{-1}$ . Очевидно, что здесь необходима невырожденность матрицы  $\mathbf{L}$ .

Утверждение 1. Если звукоприемники лежат на одной прямой, то определитель матрицы  $\mathbf{L}$  равен нулю.

Доказательство. Пусть звукоприемники лежат на одной прямой. Тогда столбцы разностей координат звукоприемников пропорциональны. Соответственно, алгебраические дополнения к элементам третьего столбца матрицы  $\mathbf{L}$  равны нулю, что влечет  $\det(\mathbf{L}) = 0$ . Утверждение доказано.

Пусть  $\det(\mathbf{L}) \neq 0$ . Расчленим  $z$  в последней формуле. Пусть

$$f = K \cdot \mathbf{b}, \quad g = K \cdot \mathbf{h}. \quad (9)$$

Тогда

$$x = P + \kappa \cdot Q, \quad (10)$$

$$\text{где } P = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}.$$

Аналогично

$$\theta = p + \kappa \cdot q, \quad (11)$$

где  $p = f_3; q = g_3$ .

После подстановки выражений (10) и (11) в формулу (5) получим кубическое относительно  $\kappa$  уравнение

$$Q^2 \cdot \kappa^3 + (2 \cdot P^T \cdot Q - q^2) \cdot \kappa^2 + (P^2 - 2 \cdot p \cdot q) \cdot \kappa - p^2 = 0. \quad (12)$$

Пусть  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  — корни уравнения (12). Если корень  $\kappa_m$  имеет ненулевую мнимую часть или  $\theta = p + \kappa_m \cdot q \geq 0$  (7), то он отвергается. Из оставшихся корней выбирается корень  $\kappa_m$ , ближайший к номиналу  $C^2$ . В итоге, искомое  $x$  вычисляется по формуле обратного сдвига

$$x = P + \kappa_m \cdot Q + a_1.$$

### Алгоритм

Для демонстрации нового алгоритма звуковой разведки вместо псевдокода мы избрали язык Mathcad, который наилучшим образом обеспечивает верификацию алгоритма и подготовку штатных программ для робототехнического комплекса звуковой разведки. Структура Mathcad-программы верификации нового алгоритма представлена на рис. 1. Именно процедура  $S(M, t)$  имитирует звукоизмерения выстрела/взрыва произвольной конфигурацией  $M$  четырех разнесенных звукоприемников (задается матрицей  $2 \times 4$ ), что приводит к столбцу  $t$  четырех отметок времени. Затем осуществляется сдвиг к локальной системе координат «пространство-время», чтобы всецело применить предыдущий п.2. Код элементарной и непринципиальной процедуры  $S(M, t)$  для краткости опускается.

На выходе  $S(M, t)$  будет столбец, два первых члена которого — восстановленные по новому алгоритму декартовы координаты ИЗ, третья координата — восстановленный момент выстрела/

взрыва, четвертая координата — восстановленная скорость звука.

Математическое ядро программы для нового алгоритма — процедура  $X(a, t)$  — представлена на рис. 2.

### Верификации нового алгоритма

Для верификации нового алгоритма был проведен следующий массивированный компьютерный эксперимент. При неизменных ИЗ  $\begin{pmatrix} 0,5 \\ 8 \end{pmatrix}$ ,  $\tau = 3$  и номинале скорости звука  $C = 2$  на вход алгоритма подавались 12 различных конфигураций ЗП в правдоподобных геометрических пропорциях. Во всех случаях, кроме одного, специально созданного (вырожденного), был получен идеальный результат.

На рис. 3 приведены результаты 3 экспериментов из 12. Крайний справа — вырожденный случай, когда все четыре ЗП лежат на одной прямой, и это в силу утверждения (1) приводит к делению на ноль.

Поясним, что на графиках рис. 3 ИЗ показан звездочкой, ЗП — точками.

Итак, предлагаемый алгоритм имеет особенность в случае расположения ЗП на одной прямой. По непрерывности близкие конфигурации будут приводить к неприемлемым ошибкам. Таким образом, становится целесообразным снабдить новый алгоритм вычислением коэффициента чувствительности, подобного PDOP в практике спутниковой навигации [5, глава 10], [19], но это уже выходит за рамки настоящей работы.

### Заключение

Разработан новый эффективный алгоритм артиллерийской звуковой разведки с одновре-

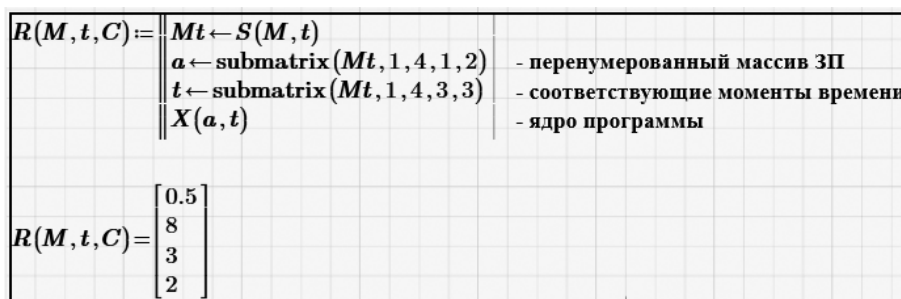


Рис. 1. Структура программы верификации нового алгоритма

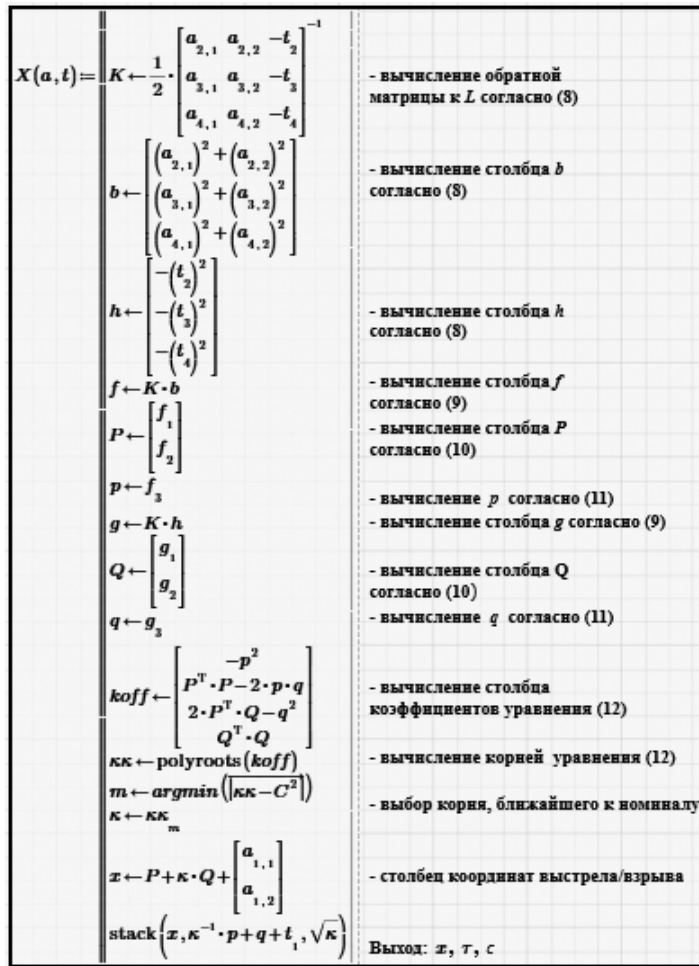


Рис. 2. Математическое ядро программы для нового алгоритма

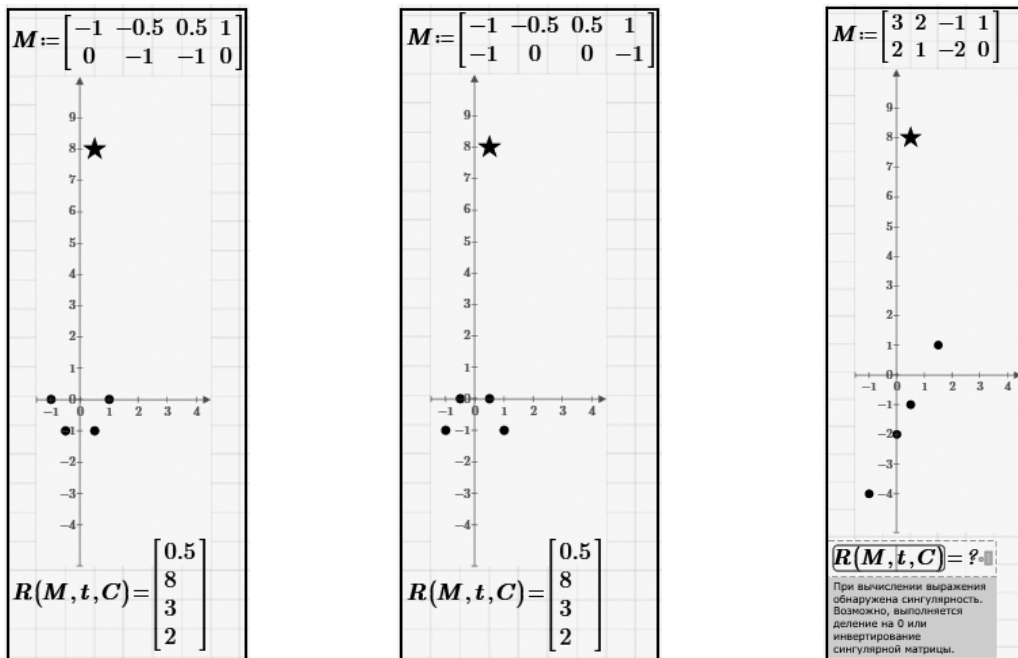


Рис. 3. Отчетные графики для верификации нового алгоритма

менным вычислением скорости звука по показаниям четырех разнесенных звукоприемников. Приведено его математическое обоснование. Новый способ обещает повышение точности артиллерийской разведки. В среде MathCad разработан прототип нового штатного алгоритма для робототехнического комплекса звуковой артиллерийской разведки.

Таким образом, сделан еще один шаг на пути к беспилотному робототехническому комплексу звуковой артиллерийской разведки.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FZEF–2024–0001.

### Список источников

1. Сафонов М.А., Шульга В.В., Камышев В.В. Основные направления развития звуковой разведки в интересах обеспечения боевых действий ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. 2020. № 11. С. 59–65.
2. Головин Н.Я., Таланов А.В. Звукометрия. Л.: Изд-во Артиллер. Ордена Ленина Академии РККА им. Дзержинского, 1938. 483 с.
3. Таланов А.В. Звуковая разведка артиллерии. М.: Военное издательство Министерства Вооруженных Сил Союза ССР, 1948. 404 с.
4. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Универсальный конечный алгоритм для разностно-дальномерных навигационных систем // Известия вузов. Приборостроение, Т. 32. 1989. № 5. С. 42–45.
5. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Математические задачи дальномерной навигации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 272 с.
6. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Алгоритмы решения навигационной разностно-дальномерной задачи от Аполлония до Коши // История науки и техники, 2008. № 11. С. 2–21.
7. Cobos M., Antonacci F., Alexandridis F. et al. A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 3956282, 24 p.
8. Chung M.A., Chou H.C., Lin C.W. Sound Localization Based on Acoustic Source Using Multiple Microphone Array in an Indoor Environment // Electronics 2022, 11, 890.
9. Mišković M., Vukmirović N., Golubović D., Eric M. Method for Direct Localization of Multiple Impulse Acoustic Sources in Outdoor Environment // Electronics. 2022. 11. 2509.
10. Kowalska-Stycze A., Peleshchak R., Lytvyn V., Peleshchak I. et al. Automatic Identification of Sound Source Position Coordinates Using a Sound Metric System of Sensors Linked with an Internet Connection // Symmetry 2022, 14, 2338.
11. Солженицын А.И. Желябугские выселки. URL: <https://rvb.ru/20vek/solzhenizyn/ss30/vol01/text/016.html?ysclid=m4ck0wahv7438590998> (дата обращения: 18.05.2024).
12. Шуляченко Р.И., Кубышкин Ю.И., Кривоносенко В.И., Холохолоенко Л.А. Артиллерийская звуковая разведка. М.: Военное издательство. 1993. 394 с.
13. Способ разностно-дальномерного определения декартовых координат приемника: пат. 2310213 Рос. Федерация. № 2005122788/09; заявл. 18.07.2005; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 31. 9 с.
14. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Алгоритм разностно-дальномерного позиционирования с оценкой скорости света // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 90–96.
15. Стагин С.С. Методика расчета координат радиотехнической системой обнаружения позиций стрелков // Технические науки — от теории к практике. 2015. № 12 (48). С. 195–202.
16. Насибуллин И.Ю., Тюсенко Е.А., Ульянов Г.Н. Вариант совершенствования автоматизированного звукометрического комплекса // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 7–8. С. 111–114.
17. Способ определения координат стреляющих артиллерийских систем и разрывов снарядов звукометрическим комплексом: пат. 2676830 Рос. Федерация. № 2017109351; заявл. 20.03.2017; опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2. 12 с.
18. Латышев А., Комарова Е. Полевой «антибиотик»: как комплексы разведки «Пенициллин» повышают эффективность российской артиллерии. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1257578-penicillin-razvedka-artilleriya?ysclid=m4cknsxmms867736994> (дата обращения: 18.05.2024).
19. Барабанова Л.П. К минимизации геометрических факторов GNSS // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 2. С. 145–152.

References

1. Safonov M.A., Shul'ga V.V., Kamyshev V.V. Osnovnye napravleniya razvitiya zvukovoi razvedki v interesakh obespecheniya boevykh deistvii raketnykh voisk i artillerii // Voennaya mysl'. № 11. 2020. Pp. 59–65.
2. Golovin N.Ya., Talanov A.V. Zvukometriya. L.: Izd. Artiller. Ordena Lenina Akademii RKKA im. Dzerzhinskogo, 1938. 483 s. URL: Publikatsiya NNR Zvukometriya (e-heritage.ru) (date of access: 18.05.2024).
3. Talanov A.V. Zvukovaya razvedka artillerii. M.: Voennoe izdatel'stvo Ministerstva Vooruzhenykh Sil Soyuza SSR, 1948.
4. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Universal'nyi konechnyi algoritm dlya raznostno-dal'nomernykh navigatsionnykh sistem // Izvestiya vuzov. Priborostroenie, T. XXXII. 1989. № 5. С. 42–45.
5. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Matematicheskie zadachi dal'nomernoi navigatsii. M.: FIZMATLIT, 2007.
6. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Algoritmy resheniya navigatsionnoi raznostno-dal'nomernoi zadachi ot Apolloniya do Koshi // Istoriya nauki i tekhniki, 2008. № 11. Pp. 2–21.
7. Cobos M., Antonacci F., Alexandridis F., Mouchtaris A., Bowon B. A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 3956282, 24 p.
8. Chung M.-A.; Chou H.-C.; Lin C.-W. Sound Localization Based on Acoustic Source Using Multiple Microphone Array in an Indoor Environment // Electronics 2022, 11, 890.
9. Miškovic' M., Vukmirovic' N., Golubovic' D., Eric' M. Method for Direct Localization of Multiple Impulse Acoustic Sources in Outdoor Environment // Electronics. 2022. 11. 2509.
10. Kowalska-Stycze A., Peleshchak R., Lytvyn V., Peleshchak I., Dyriv, A., Danylyk V. Automatic Identification of Sound Source Position Coordinates Using a Sound Metric System of Sensors Linked with an Internet Connection // Symmetry 2022, 14, 2338.
11. Solzhenitsyn A.I. Zhelyabugskie vyselki. URL: <https://rvb.ru/20vek/solzhenizyn/ss30/vol01/text/016.html?ysclid=m4ck0wahv7438590998> (date of reference: 18.05.2024).
12. Shulyachenko R.I., Kubyshkin Yu.I., Krivonosenko V.I., Kholokholenko L.A. Artilleriiskaya zvukovaya razvedka. M.: Voennoe izdatel'stvo. 1993.
13. Method of difference-dalimeter determination of Cartesian coordinates of the receiver: patent. 2310213 Ros. Federation. No. 2005122788/09; avt. 18.07.2005; published 10.11.2007, Bulletin No. 31. 9 p.
14. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Algoritm raznostno-dal'nomernogo pozitsionirovaniya s otsenkoi skorosti sveta // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2008. № 4. Pp. 90–96.
15. Statin S.S. Metodika rascheta koordinat radiotekhnicheskoi sistemoi obnaruzheniya pozitsii strelkov // Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike. 2015. № 12 (48). Pp. 195–202.
16. Nasibullin I.Y., Tyusenko E.A., Ulyanov G.N. Variant sovershenstvovaniya avtomatizirovannogo zvukometricheskogo kompleksa // Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu. 2016. № 7–8. Pp. 111–114.
17. Method of determining the coordinates of firing artillery systems and shell bursts by a sound-metric complex: patent. 2676830 Ros. Federation. No 2017109351; avt. 20.03.2017; publ. 11.01.2019, Bul. no. 2. 12 p.
18. Latyshev A., Komarova E. Field «antibiotic»: how «Penicillin» reconnaissance complexes increase the effectiveness of Russian artillery. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1257578-penicillin-razvedka-artilleriya?ysclid=m4cknsmms867736994> (date of reference: 18.05.2024).
19. Barabanova L.P. K minimizatsii geometricheskikh faktorov GNSS // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2010. № 2. Pp. 145–152.