

УДК 004.896

**В.Н. Ткаченко (д-р техн. наук, проф.), Т.С. Хашан**

Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк

отдел теории управляющих систем

E-mail: [tkachenko@iamm.ac.donetsk.ua](mailto:tkachenko@iamm.ac.donetsk.ua), [khashan@mail.ru](mailto:khashan@mail.ru)**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА ДВУМЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ**

*Представлена пространственно-временная модель пассивной акустической локации двумя мобильными роботами. Рассмотрено решение задачи определения координат положения робота для различных случаев расположения роботов и ширины баз системы технического слуха.*

**Ключевые слова:** *технический слух роботов, пеленгация источника акустического сигнала, пространственно-временная модель пассивной локации, метод Ньютона.*

**Общая постановка проблемы**

В современных робототехнических комплексах, предназначенных для решения специальных разведывательных задач, значительное внимание уделяется оснащению таких комплексов акустическими системами целеуказания. Одной из задач акустических систем является определения координат положения источника звука (ИЗ). К таким системам предъявляются жесткие требования к качеству целеуказания и распознавания в системе реального масштаба времени.

В работах [1–5] локация источника звука осуществляется одним мобильным роботом, на борту которого установлены две приемные антенны (система технического слуха, СТС). СТС работает по принципу бинаурального слуха. Основным недостатком использования одиночного робота – проведение дополнительных измерений (поворота базы СТС или перемещения самого робота). В динамически изменяющемся акустическом пространстве качественное решение задачи одной СТС не представляется возможным. Очевидно, что применение двух СТС на борту одного или двух роботов, работающих по принципу объединения информации на одном из пунктов наблюдения позволит качественно решить задачу целеуказания ИЗ.

*Целью данной работы* является построение пространственно-временной модели для определения координат положения ИЗ двумя роботами с СТС.

**Постановка задач исследования**

Для достижения цели необходимо:

- построить пространственно-временную математическую модель системы получения звуковых сигналов и времени их задержек;

- предложить численный метод и разработать программное обеспечение для решения задачи определения координат положения ИЗ;

- провести анализ решений задачи для различных случаев расположения роботов и ширины баз системы технического слуха и сделать соответствующие выводы.

**Построение модели и решение задач**

Классические методы определения пассивного пеленга основываются на измерениях параметров звукового сигнала (амплитуды и фазы) в разных точках пространства. Для решения пространственной задачи достаточно осуществлять съем звуковой информации с трех принимающих антенн. На рисунке 1 представлены две схемы пространственной локации звука двумя роботами – сигнал от ИЗ  $O(x,y,z)$  поступает на антенны роботов, один из которых (рис.1 - а) является стационарным пунктом приема сигналов С.

Для рис.1 - б сигналы от роботов поступают на стационарный пункт. По времени задержки сигналов  $\tau$  необходимо определить координаты ИЗ.

Рисунок 2 демонстрирует положение робота и его базы относительно осей координат.

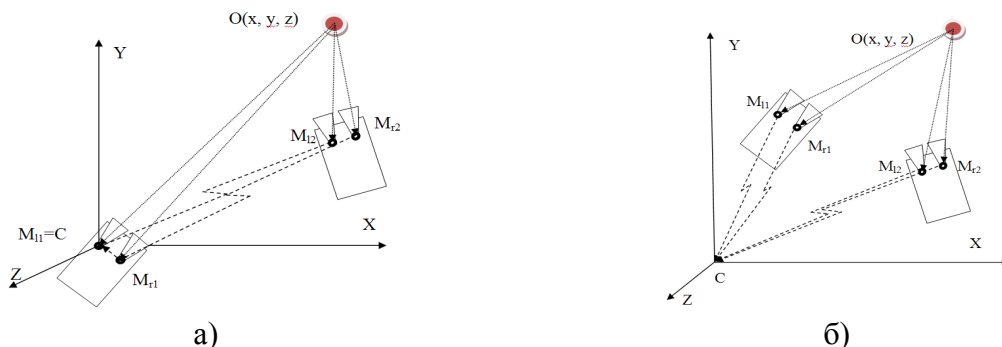


Рисунок 1 – Принцип пассивной локации звука двумя роботами:

- а) в качестве базовой станции  $C$  принимается один из приемных устройств СТС некоторого робота;
- б) базовая станция находится вне роботов

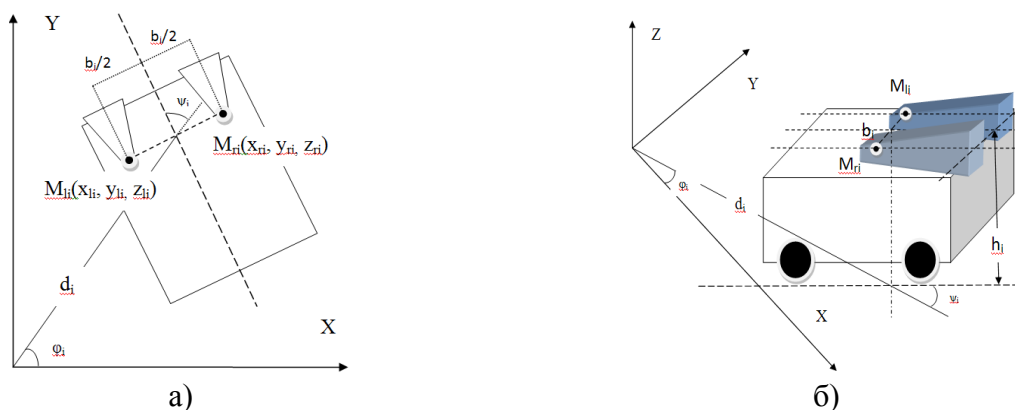


Рисунок 2 – Положение роботов в системе координат: а) вид сверху; б) вид сбоку

На рисунках 1 и 2 введены следующие основные обозначения:

- $M_{li}(x_{li}, y_{li}, z_{li}), M_{ri}(x_{ri}, y_{ri}, z_{ri})$  – левый и правый микрофоны СТС  $i$ -го робота с соответствующими координатами;
- $b_i$  – база СТС, соответственно  $b_i/2$  – расстояние от принимающего сенсора до центральной оси корпуса робота;
- $C(0, 0, 0)$  – базовая станция наблюдения, начало координат;
- $O(x, y, z)$  – объект, источник звука (ИЗ);
- $d_i$  – расстояние от стационарного пункта наблюдения  $C$  до “подошвы” робота, которая расположена в плоскости  $XU$ ;
- $h_i$  – высота расположения СТС;
- $\varphi_i$  – угол между направлением оси  $X$  и направлением от стационарной базы  $C$  до робота;
- $\psi_i$  – угол поворота робота относительно базовой линией СТС и стационарным пунктом приема.

Расположения базовой станции  $C$  в некоторой точке пространства принимаем за начало координат, относительно которой производится позиционирование роботов. В момент «съема информации» предполагается, что робот неподвижен, т.е. роботы работают в старт-стопном режиме. Следует отметить, что СТС закреплены неподвижно параллельно корпусу роботов, но могут иметь разные по ширине и по высоте базы расположения сенсоров. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать решение следующих задач для случаев, представленных на рисунках 1 - а и 1 - б:

- высоты расположения СТС и их базы на двух роботах одинаковы;

– различные вариации расположения ширины баз и высот СТС.

Координаты сенсоров СТС определяются выражением (1):

$$\begin{aligned}x_{ri} &= d_i \cos \varphi_i + \frac{b_i}{2} \sin(\varphi_i + \psi_i) \\y_{ri} &= d_i \sin \varphi_i - \frac{b_i}{2} \cos(\varphi_i + \psi_i) \\x_{li} &= d_i \cos \varphi_i - \frac{b_i}{2} \sin(\varphi_i + \psi_i) \\y_{li} &= d_i \sin \varphi_i + \frac{b_i}{2} \cos(\varphi_i + \psi_i) \\z_{ri} &= z_{li} = h_i\end{aligned}\tag{1}$$

Для определения координат источника звука используется разностно-дальномерный метод, который успешно применяется в радиотехнических пассивных системах целеуказания. Разностно-дальномерный метод основан на решении системы гиперболических уравнений в пункте приема сигналов  $C$  [6].

Как видно из рисунка 1, задержка времени прихода  $i$ -го сигнала на станцию  $C$  от  $M_{li}$  и  $M_{ri}$  находится следующим образом:

$$\tau_{ri} = \frac{1}{c} \cdot (\overline{OM_{ri}} + \overline{CM_{ri}} - \overline{OC}), \tau_{li} = \frac{1}{c} \cdot (\overline{OM_{li}} + \overline{CM_{li}} - \overline{OC}),\tag{2}$$

где  $\tau_{ri}, \tau_{li}$  – задержки времени прихода сигнала ИЗ на станцию  $C$  от принимающих антенн,  $\overline{OM_{ri}}$  и  $\overline{OM_{li}}$  – расстояния между ИЗ и станциями,  $\overline{CM_{ri}}$  и  $\overline{CM_{li}}$  – расстояния между станциями и пунктом приема сигналов,  $\overline{OC}$  – расстояние между ИЗ и пунктом приема сигналов.

Соотношения (2) связывают времена прихода сигнала ИЗ с расстояниями между микрофонами  $M_{li}, M_{ri}$  и станцией  $C$ , с расстояниями между всеми станциями и ИЗ, а также со скоростью  $c$  распространения звука в атмосфере.

Расстояние от объекта до стационарной станции наблюдения  $C$  определяется следующим соотношением:

$$\overline{OC} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},\tag{3}$$

а до микрофонов  $M_{li}, M_{ri}$ :

$$\overline{OM_{ri}} = \sqrt{(x - x_{ri})^2 + (y - y_{ri})^2 + (z - z_{ri})^2}, \overline{OM_{li}} = \sqrt{(x - x_{li})^2 + (y - y_{li})^2 + (z - z_{li})^2}\tag{4}$$

Выразив соотношения (2) в системе координат положения станций и ИЗ, получим систему нелинейных уравнений, в которой известны все величины кроме координат положения ИЗ  $(x, y, z)$ :

– в случае стационарного пункта приема сигнала система имеет вид:

$$\begin{aligned}F_j(x, y, z) &= \frac{1}{c} (\overline{OM_{ri}} + \overline{M_{ri}C} - \overline{OC}) - \tau_{ri} = 0, j = \overline{1,2} \\F_k(x, y, z) &= \frac{1}{c} (\overline{OM_{li}} + \overline{M_{li}C} - \overline{OC}) - \tau_{li} = 0, k = \overline{3,4}\end{aligned}\tag{5}$$

– в случае подвижного пункта приема (при этом считаем, что базовая станция  $C$  находится в точке  $M_{li}$ ):

$$\begin{aligned}F_j(x, y, z) &= \frac{1}{c} (\overline{OM_{ri}} + \overline{M_{ri}M_{li}} - \overline{OM_{li}}) - \tau_{ri} = 0, j = \overline{1,2} \\F_3(x, y, z) &= \frac{1}{c} (\overline{OM_{l2}} + \overline{M_{l2}M_{l1}} - \overline{OM_{l1}}) - \tau_{l2} = 0\end{aligned}\tag{6}$$

Для нахождения координат ИЗ следует решить систему 3 уравнений. Наиболее распространенным методом решения нелинейных уравнений является итерационный метод Ньютона [7].

### Численные исследования

Исходными данными для решения систем уравнений (5), (6) в нашем случае являются координаты станций наблюдения, скорость звука  $c$  и время прохождения сигнала от объекта до станций наблюдения ( $\tau_{ri}$ ,  $\tau_{li}$ ). Моделирование времен задержек и решение уравнений (5) и (6) для обоих случаев осуществлялось в пакете программы Maple.

Для системы уравнений (5) выбор трех уравнений из четырех имеющихся осуществляется на основании оценки критерия чувствительности принимающих станций к входным параметрам – точности определения времен задержек, углов пеленга и координат СТС относительно базовой станции. Можно выбрать уравнения, где время запаздывания сигнала будет наибольшим. Далее систему (5), состоящую уже из трех уравнений, решаем итерационным методом Ньютона, его вычислительная процедура описана в [7].

Численные исследования проводились для различных вариаций расположения ширины баз и высот СТС для двух рассматриваемых случаев: базовая станция находится в одном из принимающих сенсоров СТС одного из роботов (табл.1) и базовая станция находится вне СТС роботов (табл.2).

Данные высот и ширины баз СТС выбраны согласно конфигурациям разрабатываемых мобильных роботов (предполагается, что сенсорная база мобильных роботов соответствует базе расположения ушей человека и составляет в среднем 25-30 см).

Как видно из таблицы 1 (номера вычислений 1 и 2) при разных расположениях ИЗ (на рис. 3 - а это O1 и O2), но при одинаковом расположении высот СТС возникает неоднозначность – для двух разных точек положения ИЗ времена задержки будут одинаковы. Неоднозначность решения может быть исключена, если СТС роботов будут расположены на разных высотах, т.е. не должны находиться в одной плоскости (см. устранение неоднозначности за счет изменения высот и баз СТС, варианты вычислений 3 и 4 таблицы 1). Вычисления 5 - 8 таблицы 1 отображают примеры расположения роботов и объекта в пространстве. Точность вычисления и быстрота сходимости метода Ньютона зависит также от расположения ИЗ в пространстве.

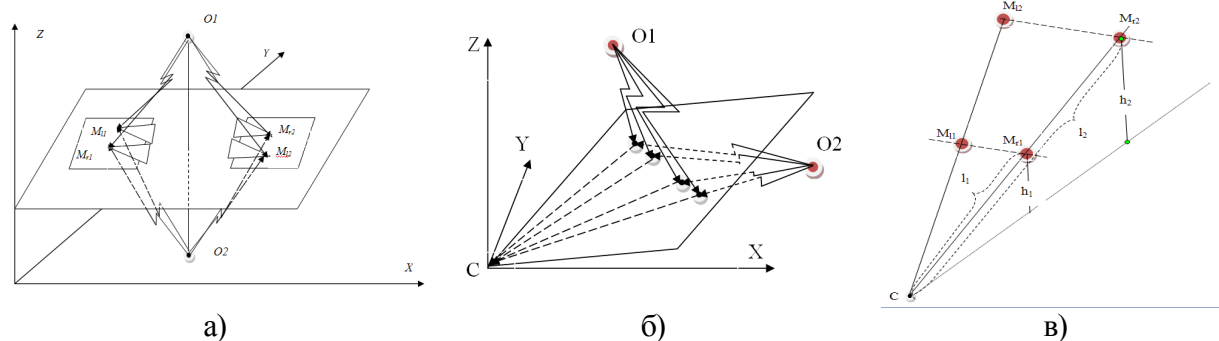


Рисунок 3 – Неоднозначность решения системы уравнений (5):

а) базовая станция находится на борту робота; б) и в) стационарная базовая станция

Как видно из таблицы 2 неоднозначность также может возникнуть и при стационарном пункте наблюдения (см. рис.3 б и в, вычисления 1 и 2 рассматриваемой таблицы). Если высоты роботов одинаковы, то неоднозначность возникает при расположении антенн на одной окружности с центром в стационарном пункте приема. Так, роботы с координатами антенн (9,987; 0,499; 0,300), (9,968; 0,798; 0,300) и база приема сигналов (0; 0; 0) находятся в одной плоскости. Объекты с координатами (19,938;1,565;0,9) и (19,97;1,57;0,29) имеют одинаковые времена задержки сигналов (рис.3 б). Если высоты расположения СТС роботов различны, то при расположении антенн параллельно и на расстояниях от пункта приема, пропорциональных высотам роботов ( $\frac{hl}{h2} = \frac{l1}{l2}$ ), также возникает неоднозначность (рис. 3 в).

Таблица 1

## Численные исследования: мобильная базовая станция

№	Координаты сенсоров роботов		b1,b2	O (x,y,z)	Задержки	Точность	Число итераций
	Робот 1 ( $x_{11}; y_{11}; z_{11}$ ) ( $x_{r1}; y_{r1}; z_{r1}$ )	Робот 2 ( $x_{12}; y_{12}; z_{12}$ ) ( $x_{r2}; y_{r2}; z_{r2}$ )					
1	(5,05;0,55;0,3) (5,34;0,60;0,3)	(0,66;4,12;0,25) (0,72;4,36;0,25)	0,3	8	3,90555e-04	Неоднозначность	
2				10	1,32048e-02		
				0,55	1,27845e-02		
3				8	3,90555e-04		
			10	1,32048e-02			
4			0,05	1,27845e-02			
			0,25	1,50008e-4	4E-4		
5			8	1,4984e-4	1E-2		
	10	3,20001e-2					
6	0,05	1,758e-2					
	0,3	8	3,54817e-03	1E-4	18		
7	(5,05;0,55;0,3) (5,34;0,60;0,3)	(0,66;4,12;0,45) (0,72;4,36;0,45)	0,25	10	7,12400e-03	4E-01	32
	0,55	6,35969e-03					
8	50	4,01428e-05	0,25	80	1,88693e-02	1E-3	38
	0,55	1,84003e-02					
9	(5,25;1,55;0,3) (5,54;1,6;0,3)	(1,66;4,32;0,45) (1,72;4,56;0,45)	0,3	(11;88;6)	1,0373e-05	1E-3	19
	0,25	(12;15;3)	4,069e-03				
					3,254e-03		
					3,051e-03		

Сравнение результатов таблиц 1 и 2 показали следующее: для мобильной базовой станции при одинаковых высотах не удастся устранить неоднозначность, когда базовая станция стационарна – неоднозначность устранить можно, сместив роботы так, чтобы они не находились в одной плоскости со стационарным пунктом приема сигналов. Достаточно малого смещения, чтобы неоднозначность была устранена.

Вычисления 3-8 таблицы 2 демонстрируют различное расположение роботов и ИЗ в пространстве.

### Выводы

1. Групповое использование роботов позволяет наделить их расширенным набором выполняемых функций, за счет чего достигается более высокая вероятность и точность выполнения задания. Точное решение задачи локализации ИЗ в динамически изменяемом акустическом пространстве может быть достигнуто при одновременной работе двух роботов с бинауральной системой технического слуха. Для этого в работе была построена пространственно-временная модель пассивной локации источника звукового двумя роботами с СТС для двух случаев: базовая станция наблюдения находится на подвижной платформе одного из роботов в точке расположения СТС и базовая станция наблюдения находится вне корпусов роботов на некотором удалении от них и стационарна.

Таблица 2

## Численные исследования: стационарная базовая станция

№ вычисл.	Координаты сенсоров роботов		b1, b2	O (x,y,z)	Задержки	Точность	Число итераций
	Робот 1 (x <sub>11</sub> ; y <sub>11</sub> ; z <sub>11</sub> ) (x <sub>r1</sub> ; y <sub>r1</sub> ; z <sub>r1</sub> )	Робот 2 (x <sub>11</sub> ; y <sub>11</sub> ; z <sub>11</sub> ) (x <sub>r1</sub> ; y <sub>r1</sub> ; z <sub>r1</sub> )					
1	(9,99;0,49;0,3) (5,54;1,6;0,3)	(9,97; 0,8;0,3) (1,72;4,56;0,45)	0,3	19,97	6,576e-6	Неоднозн.	
2				1,57	2,909e-5		
				0,29	1,928e-2		
				19,938	6,576e-6		
				1,565	2,909e-5		
				0,9	1,928e-2		
3	(5,25;1,55;0,3) (5,54;1,6;0,3)	(1,66;4,32;0,45) (1,72;4,56;0,45)	0,25	11	2,58e-03	2E-3	25
4				88	3,41e-03		
				6	2,31e-03		
				15	2,26e-03	2E-2	12
				12	1,12e-03		
				3	9,20e-04		
5	(2,75;0,55;0,3) (3,03;0,6;0,3)	(0,66;2,52;0,45) (0,72;2,75;0,45)	0,3 0,25	15	1,65e-03	3E-3	27
				12	1,45e-03		
				3	1,14e-03		
6	(2,75;0,55;0,3) (3,03;0,6;0,8)	(0,60;0,8;0,3) (0,66;2,52;1)	0,3	15	2,435e-03	1E-3	16
				12	1,187e-03		
				3	1,105e-03		
7	(5,05;0,55;0,3) (5,34;0,60;0,3)	(0,66;4,12;0,25) (0,72;4,36;0,25)	0,3	11	1,0373e-05	1E-3	38
				88	1,2338e-02		
				6	1,1689e-02		
8				8	1,0373e-05	1E-3	10
				10	1,2338e-02		
				0,55	1,1689e-02		

2. Численные исследования для двух указанных случаев показали, что для первого случая высоты и базы СТС должны быть отличными друг от друга и не располагаться в одной плоскости, иначе возникает неоднозначность результатов – для симметричных относительно этой плоскости точек время задержки сигналов будет одинаковым (см. рис.3а).

3. Для стационарной базовой станции С роботы следует располагать так, чтобы расстояния от базы не были пропорциональны высотам антенн роботов (рис. 3 - б). При малых высотах антенн погрешность решения высока – на расстоянии от 10 до 100 метров составляет 20-40 см, что приводит соответственно к ошибке пеленга. Если расстояние от ИЗ до робота менее 10 м, то ошибка локализации будет еще большей. При высоте антенны больше 80 см точность вычислений повышается, количество итераций уменьшается.

## Список использованной литературы

1. Applying scattering theory to robot audition system: Robust sound source localization and extraction. / [K. Nakadai, D. Matsuura, H. G. Okuno, H. Kitano] // In Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. - P. 1147 - 1152.
2. Microphone array for 2D sound localization and capture / [S. Kagami, Y. Tamai, H. Mizoguchi, T. Kanade] // In Proceedings IEEE International Conference on Robotics And Automation, 2004. - P. 703 - 708.
3. Wang Q. Acoustic robot navigation using distributed microphone arrays / Q. Wang, T. Ivanov, and P. Aarabi // Information Fusion (Special Issue on Robust Speech Processing). – 2004. - vol. 5, no. 2. - P. 131 - 140.

4. Hidai K. Robot audiovisual system [Электронный ресурс] / К. Hidai // Описание изобретения к патенту US 6967455 B2, 318/568.12 от 22.11.2005, Japan Science And Technology Agency, Japan Science And Technology Corporation. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/US6967455>.
5. Active Audition for Humanoid [Электронный ресурс] / [К. Nakadaiy, Т. Lourensy, Н. G. Okunoy, Н. Kitano]. – Режим доступа: <http://www.tivipe.com/TVPresearch/AAAI2000.pdf>.
6. Ванясов А.В. Способ обнаружения и определения координат источника радиоизлучения [Электронный ресурс] / А.В. Ванясов, В.П. Скляднев // Описание изобретения к патенту от 16.06.2008, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2378000-2378999/pat/servlet/servlet7906.html>.
7. Ортега Дж. Итерационные методы решения нелинейной системы уравнений со многими неизвестными / Дж. Ортега, В. Рейнболдт. – М.: Мир, 1975. – 558 с.

Надійшла до редакції:  
27.05.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Воронцов О.Г.

**В.М. Ткаченко, Т.С. Хашан**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Просторово-часова модель пасивної локації джерела звуку двома мобільними роботами.**

*Представлено просторово-часову модель пасивної акустичної локації двома мобільними роботами. Розглянуто задачу визначення координат положення джерела звуку для різних варіантів розташування роботів і ширини баз системи технічного слуху.*

**Ключові слова:** *технічний слух роботів, пеленгація джерела акустичного сигналу, просторово-часова модель пасивної локації, метод Ньютона.*

**V.N. Tkachenko, T.S. Khashan**

**Donetsk National Technical University**

**Space-time Model of the Sound Source Passive Location by Two Mobile Robots.** *The paper considers the problem of passive direction-finding by technical hearing systems (THS) of robots. The task of identifying the coordinates of the sound source location by two robots is studied.*

*To solve this problem we present a space-time model of passive acoustic location by two mobile robots. We considered the problem solution for determining the coordinates of robots location for different cases of robots location and width of technical hearing bases. To determine the coordinates of the sound source we used range-difference method. This method has been successfully applied in passive radar systems. Range-difference method is based on solving a system of hyperbolic equations in the point of signals reception. The hyperbolic equations system relates the distance between the robot and the sound signal source to the measured time of signal delay. As a numerical method we selected Newton's method, because this method has the best computing performance. Delay time modeling and hyperbolic equations solving were performed in Maple software package. Numerical studies for different variations of the location of widths of bases and heights of THS for the both cases were conducted.*

*The problem of non-uniqueness of hyperbolic equations solutions was considered, the cases of its occurrence were studied. Recommendations as for locating the robots in space allow eliminating the ambiguity of the solutions.*

**Keywords:** *robots' technical hearing, acoustic signal source direction-finding, space-time model of passive location, Newton's method.*