

УДК 53.089.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-13-21

## Структура информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства и его калибровка

Е. А. Захарова, старший преподаватель, РГРТУ имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

*Информационно-измерительный комплекс определения взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства необходим для функционирования роботизированного транспортного средства в составе автономного каравана. Комплекс основан на пространственной решетке ультразвуковых приемников, принимающих периодически излучаемые сигналы активным ультразвуковым маяком со встроенным приемником глобальной навигационной спутниковой системы позиционирования.*

*Структура информационно-измерительного комплекса разработана таким образом, чтобы обеспечить свободное подключение дополнительных модулей приема ультразвуковой волны, входящих в состав пространственной решетки, размещаемой на ведомом транспортном средстве, без существенных изменений работы комплекса в целом. Количество необходимых модулей зависит от конструктивных особенностей роботизированного средства, а также от необходимого угла обзора комплекса. Активный маяк, представляющий собой портативное устройство, закрепляется на ведущем, в качестве которого может выступать другое роботизированное средство, также являющееся участником автономного каравана, или человек-оператор.*

*Для вычисления оценки положения и траектории движения ведущего фильтром Калмана со сглаживанием по алгоритму Рауха – Тьюнга – Штрибеля необходимы координаты каждого ультразвукового приемника в локальной системе координат ведомого роботизированного средства. Для автоматизации процесса измерения координат разработана процедура калибровки пространственной решетки ультразвуковых приемников.*

*Отличительной чертой процедуры калибровки является получение координат модулей приема ультразвуковой волны в локальной системе координат ведомого транспортного средства в автоматическом режиме с использованием образцового дальномера, установленного на ведомое транспортное средство. В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что калибровка информационно-измерительного комплекса позволила снизить систематическую составляющую погрешности оценки положения ведущего до трех раз.*

**Ключевые слова:** информационно-измерительный комплекс, ведомое транспортное средство, мобильный робот, автономный караван, калибровка, лазерный сканер.

### Введение

Развитие автономизации транспортных средств (ТС) в области перевозки грузов различного назначения, в части применения сценария автономного роботизированного каравана [1, 2], привело к разработке и исследованиям информационно-измерительных комплексов, основанных на датчиках различной физической природы и позволяющих определить взаимное положение ведущего и ведомого ТС для наземных [3–11] и подводных роботизированных систем [12–15]. Это обусловлено тем, что точность оценки положения ведущего напрямую влияет на качество воспроизведения необходимой траектории ведомым роботизированным ТС. Помимо этого, сферы применения сценария автономного каравана накладывают жесткие требования на работоспособность информационно-измерительного комплекса в сложных условиях, при высокой задымленности, при наличии динамических препятствий и прочих мешающих факторов. Каждая из существующих систем имеет ряд преимуществ и недостатков. Так, например, информационно-

измерительные комплексы, основанные только на приемниках глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) или сочетании ГНСС приемника с инерциальной навигационной системой, функционируют на открытой местности, использование подобных систем в сильно урбанизированных зонах и внутри помещений затруднено. При использовании лазерных сканеров и камер видимого и инфракрасного света возникает неудобство с необходимостью знать заранее некоторые визуальные характеристики ведущего для его дальнейшей идентификации, помимо этого на качество измерительной информации сильно влияют погодные условия.

Целью работы является разработка структуры информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС, основанного на комбинировании измерительных данных ультразвуковых датчиков и ГНСС-приемника, не зависящей от конструктивных особенностей используемых роботизированных средств в составе автономного каравана, а также повышение точности оценки положения

и траектории движения ведущего за счет введения процедуры автоматизированной калибровки пространственной решетки ультразвуковых приемников.

### Теоретическая часть

Информационно-измерительный комплекс определяет взаимное положение ведущего и ведомого ТС за счет измерения времени пролета

ультразвуковой волны (ToA – Time of Arrival), испускаемой активным маяком, располагаемым на ведущем. Измерение проводится пространственной решеткой ультразвуковых приемников, которые закрепляются на ведомом ТС таким образом, чтобы обеспечить необходимый угол обзора комплекса. Структура комплекса представлена на рис. 1.

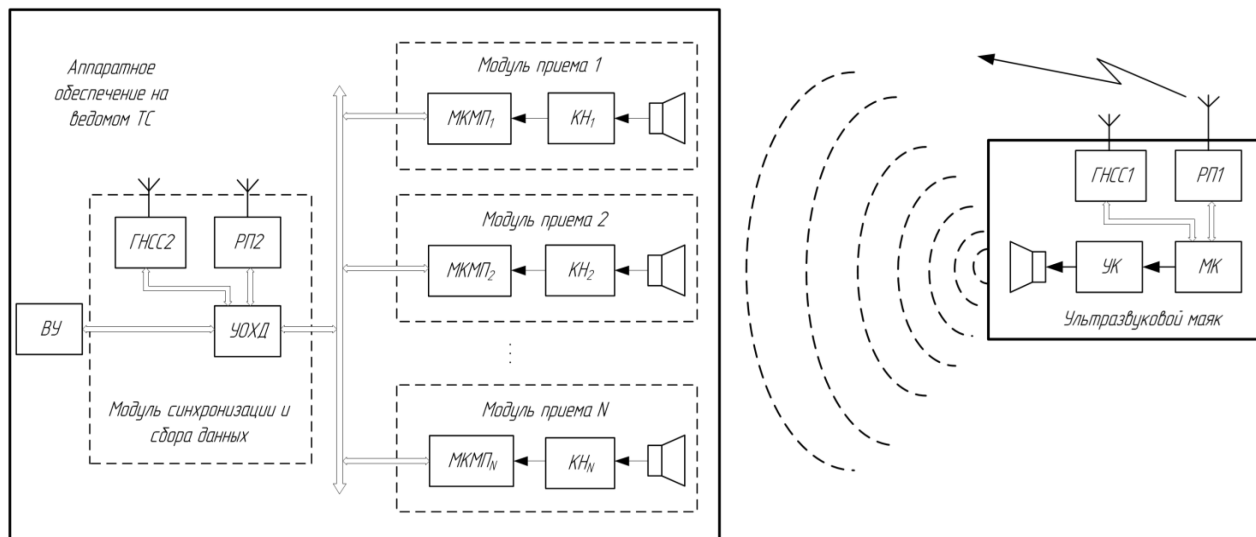


Рис. 1. Структура информационно-измерительного комплекса

Fig. 1. Structure of the information-measuring complex

Ультразвуковой маяк представляет собой портативное устройство, состоящее из ультразвукового излучателя, подключенного через усилительный каскад (УК) к микроконтроллеру (МК). Через равные промежутки времени МК формирует серию импульсов, поступающих на излучатель. Одновременно с этим через радиопередатчик РП1 отправляется команда синхронизации модулю синхронизации и сбора данных, обозначающая начало цикла измерений. В состав ультразвукового маяка входит приемник ГНСС1, измерительные данные которого с учетом корректирующих поправок используются в качестве оценки положения ведущего при выходе ультразвукового маяка из зоны видимости пространственной решетки ультразвуковых приемников.

Аппаратное обеспечение, устанавливаемое на ведомое ТС, состоит из модуля синхронизации и сбора данных и модулей приема ультразвукового сигнала, количество которых может варьироваться в зависимости от необходимой зоны видимости комплекса и размеров самого ведомого ТС. Каждый модуль приема имеет идентичную структуру, что облегчает процесс масштабирования комплекса, и включает в себя ультразвуковой приемник, канал нормализации

(КН), микроконтроллер (МКМП), передающий измерительную информацию модулю синхронизации и сбора данных. В состав модуля синхронизации и сбора данных входит устройство обработки и хранения данных (УОХД) и радиоприемник РП2 для обеспечения связи с ультразвуковым маяком. Также в состав модуля синхронизации и сбора данных входит ГНСС-приемник ГНСС2, измерительные данные которого отправляются на вычислительное устройство для дальнейшего использования. Следует отметить, что наличие ГНСС2 в составе модуля синхронизации и сбора данных является необязательным. Если ведомый роботизированный комплекс имеет штатную систему навигации и позиционирования, то в процесс функционирования информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого могут использоваться измерительные данные штатной системы.

Оценка положения ведущего и измерительные данные передаются на вычислительное устройство (ВУ) для дальнейшего использования.

Временная диаграмма работы информационно-измерительного комплекса представлена на рис. 2.

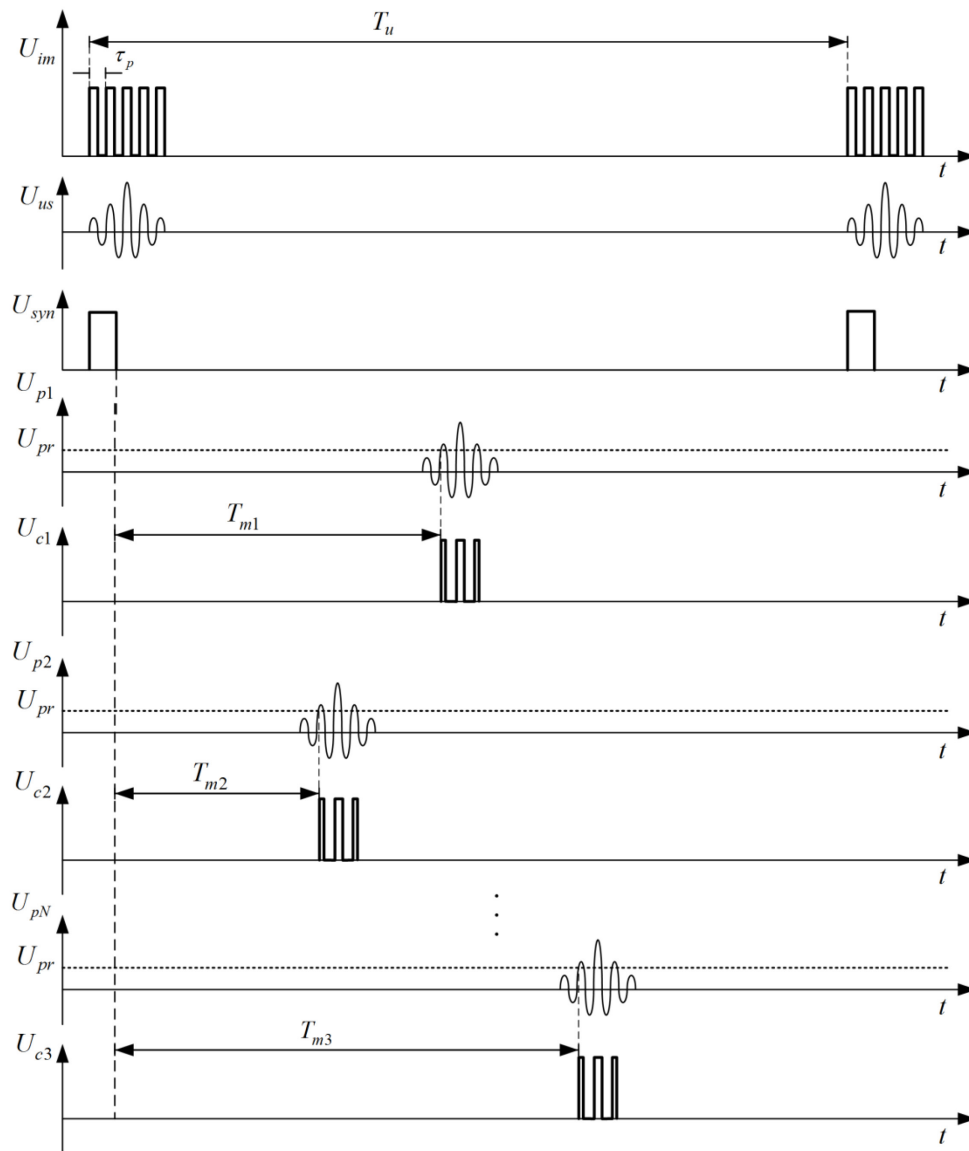


Рис. 2. Временная диаграмма функционирования информационно-измерительного комплекса

Fig. 2. Timing diagram of the information-measuring complex

В начале цикла измерений МК формирует серию импульсов с периодом  $\tau_p = 1/f_u$ , где  $f_u$  – частота ультразвукового сигнала, который преобразуется в ультразвуковую волну  $U_{us}$ , одновременно с излучением которой РП1 посылает сигнал синхронизации  $U_{syn}$ .

Сигнал синхронизации, полученный с помощью РП2, передается от модуля синхронизации и сбора данных по линии связи на каждый из модулей приема, запуская таймер отсчета времени пролета ультразвуковой волны. При приеме ультразвуковой волны сигнал с ультразвукового приемника проходит канал нормализации, на выходе которого с помощью компаратора, сравнивающего пришедший сигнал с настраиваемым пороговым уровнем напряжения  $U_{pr}$ ,

формируется серия импульсов, фронт первого из которых останавливает таймер отсчета времени пролета ультразвуковой волны соответствующего модуля приема.

Измеренные временные интервалы  $T_{m1}, \dots, T_{mN}$  пропорциональны расстояниям от каждого модуля приема до ультразвукового маяка.

Оценка траектории движения и положения ведущего относительно ведомого роботизированного комплекса осуществляется с помощью фильтра Калмана со сглаживанием по алгоритму Рауха – Тьюнга – Штрибеля [16].

Макет информационно-измерительного комплекса представлен на рис. 3.

На рис. 4 представлен пример размещения информационно-измерительного комплекса на двух мобильных роботах типа «Вомбат».



Рис. 3. Информационно-измерительный комплекс: а – активный маяк, б – модуль приема ультразвукового сигнала, в – модуль синхронизации и сбора данных

Fig. 3. Information-measuring complex: a – active beacon, б – ultrasonic receiving module, в – synchronization and data acquisition module

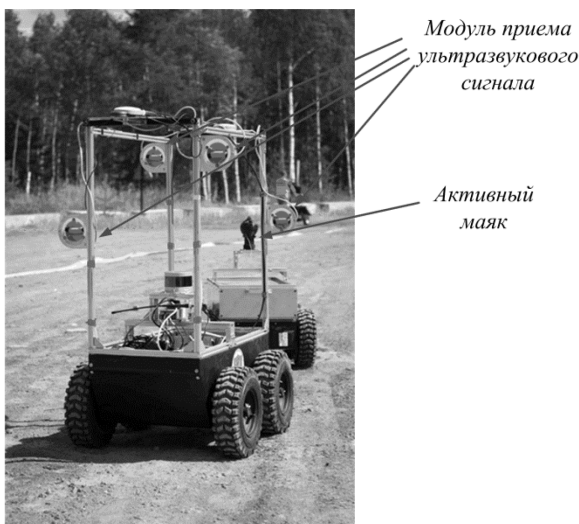


Рис. 4. Расположение информационно-измерительного комплекса на мобильных роботах типа «Вомбат»

Fig. 4. Location of information-measuring complex on mobile robots of "Wombat" type

### Процедура калибровки информационно-измерительного комплекса

Для получения оценки положения ведущего необходимо знать координаты модулей приема, закрепленных на ведомом ТС, в локальной системе координат ведомого ТС. В модели, положенной в основу описания пространственной решетки ультразвуковых приемников, они представлены точками в пространстве. Однако каждый модуль приема имеет определенные геометрические размеры и оснащен несколькими ультразвуковыми приемниками. Помимо этого

ввиду конструктивных особенностей роботизированного комплекса модули приема могут быть расположены таким образом, что ручное измерение координат с помощью линейки или рулетки трудоемко или вовсе невозможно.

Неточности в определении координат модулей приема вносят большую систематическую погрешность в оценку положения ведущего. Для решения этой проблемы была разработана процедура калибровки, позволяющая определить необходимые координаты в автоматическом режиме.

Схожей задаче по калибровке пространственных сетей датчиков различной физической природы, размещенных внутри помещения, для локализации объекта интереса посвящено множество работ, например [17–20]. Все эти работы объединяет один недостаток. Калибровка позволяет определить взаимное расположение датчиков относительно друг друга, но не их локальные координаты в системе координат пространства, в котором они закреплены. Для устранения указанного недостатка предлагается вручную измерить координаты двух-трех датчиков относительно начальной точки локальной системы координат пространства. С учетом того, что в сенсорных сетях количество датчиков превышает указанное количество, подобный подход оправдан. Однако если информационно-измерительный комплекс размещается на малогабаритном роботе, то минимальное число модулей приема, необходимое для работы комплекса, – четыре и, следовательно, необходимость в ручном измерении координат нескольких модулей приема для привязки к локальной системе координат робота снижает значимость подобной калибровки.

Зачастую ведомое ТС оснащается другими системами и измерительными комплексами, необходимыми для локализации в пространстве, выявления препятствий, а также других участников движения на пути следования и пр. Поэтому существует возможность использовать дополнительное измерительное оборудование для получения образцовой оценки положения маяка. В качестве подобного оборудования могут выступать RTK-системы (Real Time Kinematic – кинематическая система реального времени), дальнометры различной физической природы, как, например, лазерные сканеры или радары и т. д.

В настоящей работе в качестве образцового оборудования используется 3D-лазерный сканер Velodyne HDL-32E, размещаемый в начале системы координат ведомого ТС. Лазерный сканер

Velodyne HDL-32E имеет высокое угловое разрешение по вертикали  $1,33^\circ$  и горизонтали  $0,08^\circ$ , заявленная точность измерений составляет 2 см на 25 м. Ультразвуковой маяк и модули приема оснащены ультразвуковыми пьезоэлектрическими преобразователями с рабочей частотой 40 кГц и точностью – 8 мм.

Ультразвуковой маяк во время калибровки вставляется в плоскую прямоугольную рамку-мишень размером  $20 \times 30$  см с высокой отражательной способностью для инфракрасного излучения лазерного сканера, что упрощает процедуру распознавания маяка в облаке пространственной картины вокруг робота с помощью порогового метода. Площадь рамки выбрана таким образом, что при ее перемещении на предельных расстояниях от робота частое попадание лучей лазерного сканера на мишень также обеспечивает надежную идентификацию маяка.

Во время калибровки маяк перемещается произвольным случайным образом в зоне видимости модулей приема. При перемещении маяка синхронно передается выборка образцовых координат лазерного сканера  $\bar{x}_i^m = [x_i^m \ y_i^m \ z_i^m]^T$  и измерительные данные расстояний до маяка от каждого из ультразвуковых приемников  $r_{n,l}$ ,  $l=1, \dots, L$ , где  $L$  – объем выборки. Для определения оптимального вектора координат модулей приема  $\bar{w}$  в пространственной решетке минимизируется следующий функционал качества

$$\Phi(\bar{w}) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \delta_{l,n}^2 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \left[ (x_n - x_l^m)^2 + (y_n - y_l^m)^2 + (z_n - z_l^m)^2 - r_{l,n}^2 \right] \rightarrow \min_{\bar{w}}$$

$$\bar{w} = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ \dots \ x_N \ y_N \ z_N]^T -$$

вектор параметров размерностью  $(3N) \times 1$ , в качестве которых используются искомые координаты каждого модуля приема;

$N$  – количество приемников;

$\bar{\delta} = [\delta_{1,1} \ \dots \ \delta_{1,N} \ \dots \ \delta_{L,1} \ \dots \ \delta_{L,N}]^T$  – вектор ошибок, размерностью  $(L \cdot N) \times 1$ ;

$\bar{x}^m = [x^m \ y^m \ z^m]^T$  – координаты маяка в локальной системе координат ведомого робота, полученные с помощью 3D-лазерного сканера;

$r_n$  – расстояние от маяка до  $n$ -го приемника, измеренного этим приемником;

$L$  – количество измерений 3D-лазерного сканера.

Минимизация осуществляется методом Левенберга – Марквардта [21].

$$\bar{w}[k+1] = \bar{w}[k] -$$

$$-\left( J^T[k] \cdot J[k] + \lambda \cdot \text{diag}(J^T[k] \cdot J[k]) \right)^{-1} J^T[k] \bar{\delta}[k],$$

где матрица Якоби первых частных производных ошибок по элементам вектора параметров  $\bar{w}$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta_{1,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial \delta_{1,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \delta_{1,1}}{\partial w_{3N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \delta_{1,N}}{\partial w_1} & \frac{\partial \delta_{1,N}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \delta_{1,N}}{\partial w_{3N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \delta_{L,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial \delta_{L,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \delta_{L,1}}{\partial w_{3N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \delta_{L,N}}{\partial w_1} & \frac{\partial \delta_{L,N}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \delta_{L,N}}{\partial w_{3N}} \end{bmatrix};$$

$\lambda$  – параметр регуляризации;

$k$  – номер итерации.

### Экспериментальные исследования

На рис. 5 представлено схематичное расположение модулей приема на мобильном роботе типа «Вомбат» во время проведения процедуры калибровки.

В табл. 1 представлены координаты размещения модулей приема в локальной системе координат мобильного робота, измеренные ручным способом, а также координаты модулей приема, полученные после проведения процедуры калибровки.

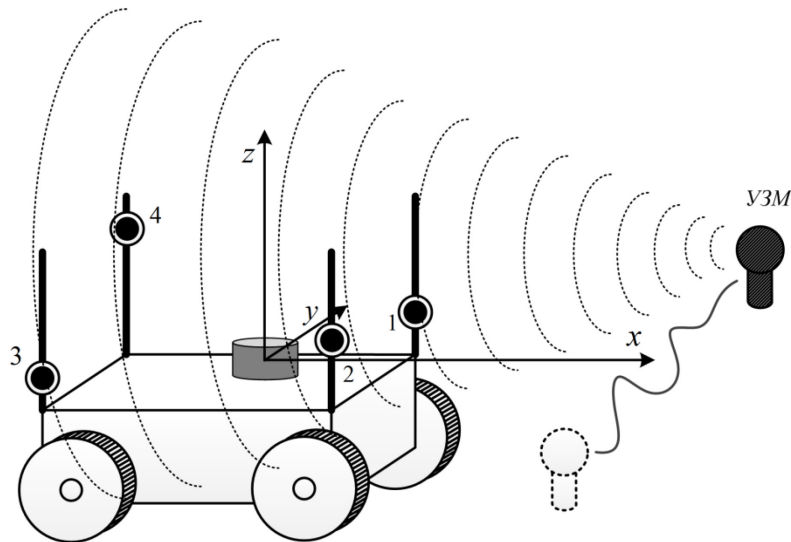


Рис. 5. Схема расположения информационно-измерительного комплекса при проведении процедуры калибровки

Fig. 5. Location of information-measuring complex during the calibration procedure

Таблица 1. Координаты размещения модулей приема  
Table 1. Coordinates of receiving module placement

Параметр	Координата	Модуль приема 1, м	Модуль приема 2, м	Модуль приема 3, м	Модуль приема 4, м
До калибровки	$x$	0,25	0,25	-0,6	-0,6
	$y$	-0,25	0,25	-0,25	0,25
	$z$	0,35	0,4	0,15	0,6
После калибровки	$x$	0,2499	0,2255	-0,6033	-0,5826
	$y$	-0,2942	0,2452	-0,2775	0,2413
	$z$	0,3549	0,4318	0,1408	0,6265

На рис. 6 представлены траектории движения маяка до и после проведения процедуры калибровки, а также динамические погрешности в виде расстояний между оценкой траектории маяка и образцовой траекторией, полученной с помощью лазерного сканера, на плоскости  $|\Delta_2|$  и в пространстве  $|\Delta_3|$ .

Маяк перемещался по прямоугольной траектории размером 3×6 метров по часовой стрелке из точки (0;1) относительно статичного мобильного робота с размещенной на нем пространственной решеткой с четырьмя ультразвуковыми приемниками. Лазерный сканер Velodyne HDL-32E располагался в центре координат мобильного робота в точке (0;0).

Результаты эксперимента в виде СКО оценки траектории маяка на плоскости  $(x; y)$  и в пространстве  $(x; y; z)$  сведены в табл. 2. Как видно из рис. 6 и табл. 2, процедура калибровки позволила существенно снизить систематическую составляющую погрешности оценки положения ведущего.

Таблица 2. СКО оценки траектории маяка на плоскости и в пространстве при движении по прямоугольной траектории 3×6 м

Table 2. RMS estimates of the beacon trajectory on the plane and in space when moving along a rectangular trajectory of 3×6 m

Параметр	СКО( $ \Delta_2 $ ), м	СКО( $ \Delta_3 $ ), м
До калибровки	0,4589	0,6983
После калибровки	0,1401	0,2224

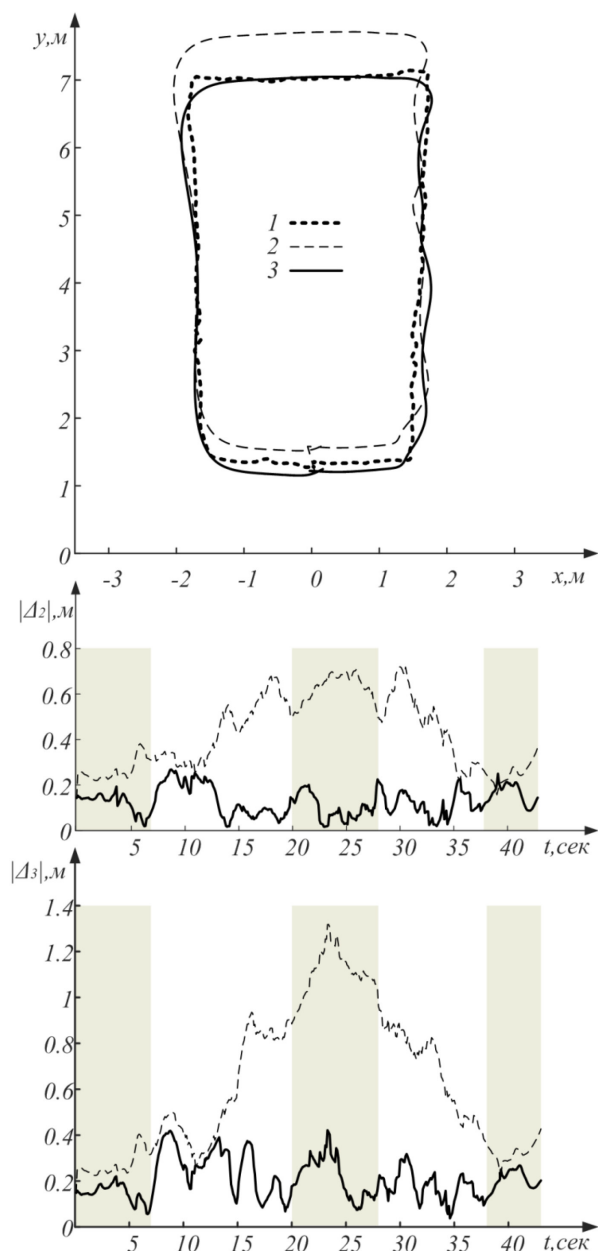


Рис. 6. Оценка прямоугольной траектории маяка и ее динамическая ошибка  $3 \times 6$  м: 1 – образцовая траектория движения маяка, 2 – траектория движения маяка, вычисленная до проведения процедуры калибровки, 3 – траектория движения маяка, вычисленная после проведения процедуры калибровки

Fig. 6. Estimation of the rectangular trajectory of the beacon and its dynamic error  $3 \times 6$  m: 1 - reference trajectory of beacon movement, 2 - trajectory of beacon movement calculated before calibration procedure, 3 - trajectory of beacon movement calculated after calibration procedure

### Заключение

Информационно-измерительный комплекс с возможностью масштабирования в зависимости от габаритных размеров ведомого ТС и необходимой зоны видимости ведущего является удобным решением, позволяющим оснастить любое роботизированное устройство для ис-

пользования в сценариях автономного каравана. А процедура калибровки позволяет увеличить точность конечной оценки положения ведущего относительно ведомого ТС до 3 раз в области видимости пространственной решетки ультразвуковых приемников за счет уменьшения систематической составляющей погрешности определения координат модулей приема в локальной системе координат робота.

### Библиографические ссылки

1. Зенкевич С. Л., Хуа Ч., Цзяньвень Х. Экспериментальное исследование движения группы мобильных роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 5. С. 331–335. DOI: 10.17587/mau.19.331-335.
2. Веселов Г. Е., Лебедев Б. К., Лебедев О. Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Информатизация и связь. 2021. № 3. С. 7–11. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-7-11.
3. Yang T. et al. A Leader-following Method Based on Binocular Stereo Vision For Quadruped Robots // 2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2019. С. 677–682. DOI: 10.1109/CYBER46603.2019.9066605.
4. Wang Y. et al. Vision-Based Flexible Leader-Follower Formation Tracking of Multiple Nonholonomic Mobile Robots in Unknown Obstacle Environments // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2019. Т. 28, № 3. С. 1025–1033, DOI: 10.1109/TCST.2019.2892031.
5. Pingali T. R., Lemaire E. D., Baddour N. Ultrasonic Tethering to Enable Side-by-Side Following for Powered Wheelchairs // Sensors. 2019. Т. 19, № 1. С. 109. DOI: 10.3390/s19010109.
6. Stancovici A. et al. Relative positioning system using inter-robot ultrasonic localization turret // 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. IEEE, 2014. С. 1427–1430, DOI: 10.1109/I2MTC.2014.6860981.
7. Min B. C., Matson E. T. Robotic follower system using bearing-only tracking with directional antennas // Robot Intelligence Technology and Applications 2. Springer, Cham, 2014. С. 37–58.
8. Dichgans J., Kallwies J., Wuensche H. J. Robust Vehicle Tracking with Monocular Vision using Convolutional Neuronal Networks // 2020 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). IEEE, 2020. С. 297–302, DOI: 10.1109/MFI49285.2020.9235213.
9. Kim J., Jeong H., Lee D. Single 2D lidar based follow-me of mobile robot on hilly terrains // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Т. 34, № 9. С. 3845–3854. DOI:10.1007/s12206-020-0835-7.
10. Algabri R., Choi M. T. Deep-Learning-Based Indoor Human Following of Mobile Robot Using Color Feature // Sensors. 2020. Т. 20, № 9. С. 2699. DOI:10.3390/s20092699.

11. Fries C., Wuensche H. J. Monocular template-based vehicle tracking for autonomous convoy driving // 2014. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014. С. 2727–2732. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942935.

12. Локальное позиционирование подводных аппаратов гидроакустической системой с ЛЧМ зондирующими сигналами / В. И. Каевичер и др. // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 11. С. 17. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.11.14.

13. Частотный метод измерения угловых координат подводного аппарата гидроакустической системой локального позиционирования / В. И. Каевичер и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.3.1.

14. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. – 2018. – № 4. – С. 66–75.

15. Широков В. А. Экспериментальный комплекс для исследования возможностей использования гидроакустических датчиков в системах подводного видения / В. А. Широков, В. Н. Милич // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 54–64. DOI 10.22213/2413-1172-2021-4-54-64.

16. Goll S., Zakharova E. An active beacon-based leader vehicle tracking system // ACTA IMEKO. 2019. Т. 8, № 4. С. 33–40. DOI:10.21014/acta\_imeko.v8i4.685.

17. Wendeberg J. et al. Calibration-free TDOA self-localisation // Journal of Location Based Services. 2013. Т. 7. № 2. С. 121–144. DOI:10.1080/17489725.2013.796410.

18. Sidorenko J. et al. Self-Calibration for the Time Difference of Arrival Positioning // Sensors. 2020. Т. 20, № 7. С. 2079. DOI:10.3390/s20072079.

19. Batstone K., Oskarsson M., Åström K. Robust time-of-arrival self calibration with missing data and outliers // 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2016. С. 2370–2374. DOI: 10.1109/EUSIPCO.2016.7760673.

20. Hol J. D., Schön T. B., Gustafsson F. Ultra-wideband calibration for indoor positioning // 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. IEEE, 2010. Т. 2. С. 1–4. DOI: 10.1109/ICUWB.2010.5616867.

21. Goll S., Zakharova E. Calibration Procedure for the Beacon-based Tracking System to be used for Mobile Robot Convoying // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2019. С. 1–5. DOI: 10.1109/MECO.2019.8760118.

## References

1. Zenkevich S.L., Hua C., Jianwen X. [Experimental study of motion of a group of mobile robots in a "convoy" type formation]. Mechatronics, Automation, Control. 2018. Vol. 19, no. 5. Pp. 331-335. DOI: 10.17587/mau.19.331-335 (in Russ.).

2. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. [Motion control of a group of mobile robots in a column]. Informatization and communication. 2021. No. 3.

Pp. 7-11. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-7-11 (in Russ.).

3. Yang T. et al. A Leader-following Method Based on Binocular Stereo Vision For Quadruped Robots. In 2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2019. Pp. 677-682. DOI: 10.1109/CYBER46603.2019.9066605.

4. Wang Y. et al. Vision-Based Flexible Leader-Follower Formation Tracking of Multiple Nonholonomic Mobile Robots in Unknown Obstacle Environments. In IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2019. Vol. 28, no. 3. Pp. 1025-1033, DOI: 10.1109/TCST.2019.2892031.

5. Pingali T.R., Lemaire E.D., Baddour N. Ultrasonic Tethering to Enable Side-by-Side Following for Powered Wheelchairs. In Sensors. 2019. Vol. 19, no. 1. P. 109. DOI: 10.3390/s19010109.

6. Stancovici A. et al. Relative positioning system using inter-robot ultrasonic localization turret. In IEEE. 2014. International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. IEEE. 2014. Pp. 1427-1430. DOI: 10.1109/I2MTC.2014.6860981.

7. Min B.C., Matson E.T. Robotic follower system using bearing-only tracking with directional antennas. In Robot Intelligence Technology and Applications 2. Springer, Cham, 2014. Pp. 37-58.

8. Dichgans J., Kallwies J., Wuensche H. J. Robust Vehicle Tracking with Monocular Vision using Convolutional Neural Networks. In IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). IEEE, 2020. Pp. 297-302. DOI: 10.1109/MFI49285.2020.9235213.

9. Kim J., Jeong H., Lee D. Single 2D lidar based follow-me of mobile robot on hilly terrains. In Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Vol. 34, no. 9. Pp. 3845-3854. DOI:10.1007/s12206-020-0835-7.

10. Algabri R., Choi M.T. Deep-Learning-Based Indoor Human Following of Mobile Robot Using Color Feature. In Sensors. 2020. Vol. 20, no. 9. P. 2699. DOI:10.3390/s20092699.

11. Fries C., Wuensche H.J. Monocular template-based vehicle tracking for autonomous convoy driving // 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014. Pp. 2727-2732. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942935.

12. Kaevitz V.I. et al. [Local positioning of underwater vehicles by hydroacoustic system with LFM probing signals]. Journal of Radioelectronics. 2018. No. 11. P. 17. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.11.14 (in Russ.).

13. Kaevitz V.I. et al. [Frequency method for measuring angular coordinates of an underwater vehicle by a hydroacoustic local positioning system]. Journal of Radioelectronics. 2021. No. 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.3.1 (in Russ.).

14. Arsent'ev V.G., Krivolapov G.I. [Positioning of objects in the hydroacoustic navigation system with ultra-short base]. Vestnik SibGUTI. 2018. No. 4. Pp. 66-75 (in Russ.).



15. Shirokov V.A., Milich V.N. [Experimental complex for research of hydroacoustic sensors in underwater vision systems]. Bulletin of IzhGTU named after M. T. Kalashnikov. 2021. Vol. 24, no. 4. Pp. 54-64. DOI 10.22213/2413-1172-2021-4-54-64 (in Russ.).
16. Goll S., Zakharova E. An active beacon-based leader vehicle tracking system. In ACTA IMEKO. 2019. Vol. 8, no. 4. Pp. 33-40. DOI:10.21014/acta\_imeko.v8i4.685.
17. Wendeberg J. et al. Calibration-free TDOA self-localisation. In Journal of Location Based Services. 2013. Vol. 7, no. 2. Pp. 121-144. DOI:10.1080/17489725.2013.796410.
18. Sidorenko J. et al. Self-Calibration for the Time Difference of Arrival Positioning. In Sensors. 2020. Vol. 20, no. 7. Pp. 2079. DOI:10.3390/s20072079.
19. Batstone K., Oskarsson M., Åström K. Robust time-of-arrival self calibration with missing data and outliers. In 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2016. Pp. 2370-2374. DOI: 10.1109/EUSIPCO.2016.7760673.
20. Hol J.D., Schön T.B., Gustafsson F. Ultra-wideband calibration for indoor positioning. In 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. IEEE, 2010. Vol. 2. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICUWB.2010.5616867.
21. Goll S., Zakharova E. Calibration Procedure for the Beacon-based Tracking System to be used for Mobile Robot Convoying. In 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2019. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/MECO.2019.8760118.

\*\*\*

### **Structure of the Information-Measuring Complex for Determining the Mutual Position of the Master and Slave Vehicles and Its Calibration**

*E. A. Zakharova*, Senior Lecturer, RSREU named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

*The information-measuring complex for determining the mutual position of master and slave vehicles is necessary for the functioning of a robotic vehicle as a part of an autonomous convoy. The complex is based on a spatial array of ultrasonic receivers receiving periodically emitted signals by an active ultrasonic beacon with a built-in receiver of the global navigation satellite positioning system.*

*The structure of information-measuring complex is designed to provide free connection of additional modules of ultrasonic wave receivers, included in the spatial array placed on the slave vehicle, without significant changes in the work of the complex as a whole. The number of required modules depends on the design features of the robotic vehicle, as well as on the required viewing angle of the complex. An active beacon, which is a portable device, is attached to its master, which can be another robotic vehicle, being a member of an autonomous convoy, or a human operator.*

*The coordinates of each ultrasonic receiver in the local coordinate system of the slave robotic vehicle are needed to calculate the position and trajectory of the master by the Kalman filter with smoothing according to the Rauch-Thung-Strubel algorithm. To automatize the coordinate measurement process, a procedure for calibrating the spatial array of ultrasonic receivers has been developed.*

*A distinctive feature of the calibration procedure is obtaining the coordinates of the ultrasonic receiver modules in the local coordinate system of the slave vehicle in automatic mode using a reference rangefinder mounted on the slave vehicle. In the course of experimental studies, it was found that the calibration of the information-measuring complex allowed to reduce the systematic component of the error in assessing the position of the master up to three times.*

**Keywords:** information-measuring complex, slave vehicle, autonomous convoy, calibration, laser scanner.

Получено: 28.01.22