

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.518.3

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-4-12

### Комбинированная оценка взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства по данным ультразвуковых приемников и ГНСС-модуля

С. А. Голь, кандидат технических наук, доцент, РГРТУ им. В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

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

*В статье рассматривается задача определения положения ведущего при реализации сценария работы роботизированного транспортного средства в составе системы караванного вождения. Указанный сценарий работы предполагает воспроизведение ведомым транспортным средством траектории движения ведущего, которым может быть транспортное средство под управлением человека, другое роботизированное транспортное или человек-оператор. Для обеспечения надежного функционирования роботизированного транспортного средства в составе автономного каравана необходима надежная и точная оценка положения и траектории движения ведущего, не зависящая от условий окружающей среды.*

*Использование ультразвуковых приемников и излучателей в составе информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства позволяет функционировать в любое время суток внутри и вне помещений при присутствии динамических препятствий, задымления, осадков и пр.*

*Оценка положения и траектории движения ведущего осуществляется за счет измерения времени прибытия ультразвуковой волны, испускаемой активным маяком, до пространственной решетки ультразвуковых приемников. Подобное косвенное измерение расстояний между маяком и каждым из приемников позволяет получить систему уравнений, для решения которой использован фильтр Калмана со сглаживанием по алгоритму Рауха – Тунга – Штрибеля.*

*Основным недостатком указанного подхода является радиус работы до 20 метров, что является достаточным при сложном маневрировании. Для увеличения дальности работы комплекса на открытых участках местности, что зачастую требуется при транспортировке грузов по дорогам общего пользования, предложена комбинированная оценка положения ведущего на основе измерительных данных пространственной решетки ультразвуковых приемников и модуля глобальной навигационной спутниковой системы.*

**Ключевые слова:** система караванного вождения, информационно-измерительный комплекс, роботизированное транспортное средство, ультразвуковой маяк, пространственная решетка ультразвуковых приемников, оценка положения ведущего, приемник глобальной навигационной спутниковой системы, динамическая погрешность.

#### Введение

Автономизация транспортных средств (ТС) на сегодняшний день является одним из перспективных направлений развития робототехники, поскольку потребность в автономном караване роботизированных ТС, способных осуществлять перевозку полезного груза без или с минимальным участием человека, возрастает с каждым днем. Во всем мире научно-исследовательские группы крупнейших автомобильных концернов, таких как ПАО «КамАЗ», ГК «ГАЗ», Scania, Volvo, Daimler Trucks и других, занимаются разработками в сфере автономного вождения в составе колонны. Данный сценарий работы предполагает движение ведомого ТС по максимально приближенному к траектории ведущего пути. Ведущим может быть другое роботизиро-

ванное ТС, также являющееся участником автономной колонны, ТС, находящееся под управлением человека, или непосредственно сам человек-оператор, если ведомое ТС движется с соизмеримой скоростью. Популярность указанного сценария работы объясняется тем, что грузоперевозки, осуществляемые с помощью автономных колонн роботизированных ТС, позволяют сократить расходы, связанные с человеческим фактором, увеличить безопасность в сфере транспортной логистики, что особенно актуально в зонах ведения военных конфликтов, ликвидации чрезвычайных ситуаций и пр. Помимо этого, реализация сценария движения за ведущим не требует больших вычислительных мощностей или обилия дорогостоящего оборудования по сравнению с полностью автономными ТС, поскольку траектория

движения ведомого зависит в большей степени от траектории движения ведущего. Таким образом, корректируя движение последнего, можно исключить труднопроходимые участки дороги или статические препятствия для ведомого ТС.

Для обеспечения надежного воспроизведения траектории движения ведущего ведомым ТС необходима точная и надежная оценка положения ведущего относительно ведомого с возможностью хранения скользящего окна значений, в совокупности представляющих собой планируемую будущую траекторию движения ведомого. Ввиду вышесказанного особую роль в реализации рассматриваемого сценария работы роботизированного ТС играет информационно-измерительный комплекс определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС. В настоящий момент существует большое количество исследований, посвященных разработке информационно-измерительного комплекса, позволяющего оценивать положение ведущего в недетерминированной окружающей среде с учетом разного рода помех в любое время суток и при любых погодных явлениях. Подобные комплексы базируются на разных типах датчиков, таких как приемники системы глобального спутникового позиционирования ГЛОНАСС/GPS [1–3], видеокамеры видимого и инфракрасного диапазонов [4–6], лазерные сканирующие дальномеры [7, 8], радарные и ультразвуковые дальномеры [9–11], а также их сочетания [12, 13]. Однако у каждого из них есть свои достоинства и недостатки. Использование глобальных спутниковых систем позиционирования ограничено открытыми территориями. Внутри помещений и урбанизированных зон использовать подобные системы

практически невозможно. Лазерные сканирующие и радарные дальномеры позволяют определить расстояние между окружающими объектами и беспилотным транспортным средством, но при этом достаточно сложно поддается идентификации ведущий объект. Использование камер видимого и инфракрасного диапазонов осложняется зависимостью от условий окружающей среды. Помимо того, возникновение препятствий между ведущим и ведомым ТС существенно ухудшает оценку взаимного расположения.

Целью работы является получение оценки положения ведущего относительно ведомого транспортного средства информационно-измерительным комплексом, построенным на базе ультразвуковых излучателей и приемников, позволяющих комплексу функционировать в дневное и ночное время суток при любых погодных условиях как вне, так и внутри помещений, с учетом внешних помех различной физической природы, а также расширение дальности работы комплекса за счет введения в состав приемника глобальной навигационной спутниковой системы позиционирования.

#### Теоретическая часть

Информационно-измерительный комплекс определения взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства, рассматриваемый в этой работе, включает в себя активный ультразвуковой маяк, закрепляемый на ведущем, и пространственную решетку ультразвуковых приемников, размещаемую на ведомом ТС таким образом, чтобы обеспечить зону прямой видимости между маяком и приемниками (рис. 1).

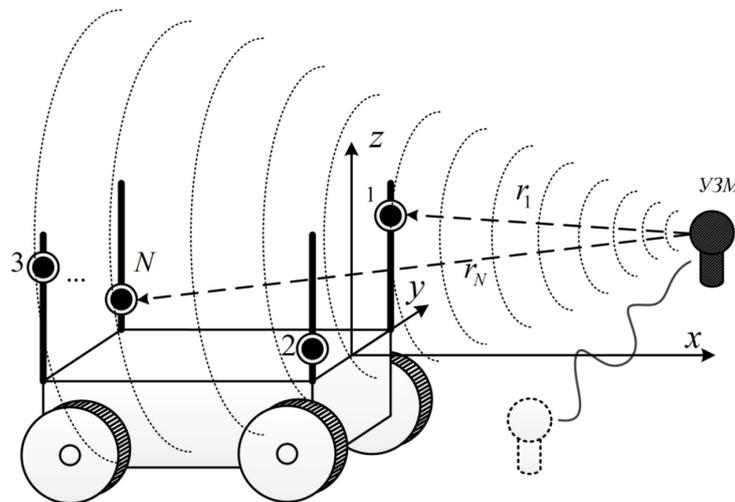


Рис. 1. Ультразвуковой маяк и пространственная решетка ультразвуковых приемников, закрепленная на ведомом мобильном роботе

Fig. 1. Ultrasonic beacon and spatial array of ultrasonic receivers attached to the slave mobile robot

Комплекс основан на методе измерения времени прибытия ультразвуковой волны (ТоА – Time of Arrival). Через равные промежутки времени, определяемые необходимой частотой измерений положения ведущего, активный маяк (УЗМ) испускает ультразвуковую волну. Одновременно с этим активным маяком передается команда по радиосвязи, являющаяся сигналом синхронизации. При получении сигнала синхронизации каждый из ультразвуковых приемников, входящих в состав пространственной решетки, запускает таймер отсчета времени, измеряющий временной интервал от начала испускания ультразвуковой волны маяком до момента прибытия ее на каждый из приемников. Момент прибытия ультразвуковой волны определяется с помощью порогового метода при достижении сигнала с ультразвуковых приемников определенного уровня напряжения. С учетом того что скорость распространения радиоволн в воздухе на несколько порядков выше скорости распространения ультразвука, временем распространения радиосигнала можно пренебречь.

Таким образом, каждый из  $N$  приемников измеряет временной интервал от момента приема радиоимпульса до момента приема ультразвуковой волны. С учетом известного соотношения  $r_n = c\tau_n$ ,  $n = 1, \dots, N$ , где  $c$  – скорость распространения ультразвука в воздухе,  $\tau_n$  – временной интервал, измеренный  $n$ -м приемником, каждый из приемников косвенно измеряет расстояние до активного маяка.

Для определения координат маяка в локальной системе координат ведомого ТС решается система из  $N$  нелинейных алгебраических уравнений, число которых соответствует количеству ультразвуковых приемников, закрепленных на ведомом ТС

$$r_n^2 = (x^m - x_n)^2 + (y^m - y_n)^2 + (z^m - z_n)^2, \quad n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где  $\vec{u} = [x^m \quad y^m \quad z^m]^T$  – вектор искомых координат маяка и  $\vec{x}_n^r = [x_n \quad y_n \quad z_n]^T$  – координаты  $n$ -го приемника в локальной системе координат ведомого ТС.

Поскольку система алгебраических уравнений не линейна, то очевидным выбором методов ее решения являются нелинейные методы оценивания, такие как расширенный фильтр Калмана, ансцентый фильтр Калмана, фильтр частиц и др. Однако с помощью подхода, опи-

санного в работах [14, 15], система уравнений (1) может быть преобразована к линейному виду, в котором используются все  $L = C_N^2$  комбинаций разностей квадратов расстояний.

$$\begin{aligned} r_i^2 - r_j^2 &= (x^m - x_i)^2 + (y^m - y_i)^2 + (z^m - z_i)^2 - \\ &- (x^m - x_j)^2 - (y^m - y_j)^2 - (z^m - z_j)^2; \\ &i, j = 1, \dots, N; \quad i \neq j; \end{aligned}$$

$C_N^2$  – биномиальный коэффициент.

При этом количество уравнений, по сравнению с исходной системой (1), становится равным  $N-1$ .

После преобразований система приобретет линейный вид

$$B\vec{u} = \vec{g}, \quad (2)$$

где  $B$  – матрица системы, состоящая из  $L$  строк вида  $[2(x_j - x_i) \quad 2(y_j - y_i) \quad 2(z_j - z_i)]$ ,  $\vec{g}$  – вектор свободных членов, состоящий из  $L$  элементов  $(r_i^2 - r_j^2 + x_j^2 - x_i^2 + y_j^2 - y_i^2 + z_j^2 - z_i^2)$ ;  $i, j = 1, \dots, N; \quad i \neq j$ .

С учетом вышеизложенного для решения системы уравнений (2) могут быть применены линейные методы, являющиеся наиболее предпочтительными по сравнению с нелинейными методами, поскольку они позволяют произвести оценку интересующих параметров без использования упрощения модели системы или аппроксимации плотности вероятности, существенно повышающей время вычислений.

Одним из методов решения системы линейных уравнений (2) является фильтр Калмана, оценивающий вектор состояния системы с помощью минимизации среднего значения квадрата ошибки [14]. Рекурсивный характер фильтра позволяет применить для оценки вектора состояния наряду с текущим наблюдением все прошлые измерения.

Модель стохастической системы с использованием (2) [17]:

$$\begin{cases} \vec{x}_{k+1} = A\vec{x}_k + \vec{\xi}_k, \\ \vec{g}_k = C\vec{x}_k + \vec{\eta}_k, \end{cases}$$

где  $\vec{x}_k = [x_k^m \quad y_k^m \quad z_k^m \quad v_k^x \quad v_k^y \quad v_k^z]^T$  – вектор состояния из координат маяка и компонент вектора его скорости;  $P_k$  – матрица ковариации вектора оценки состояния;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{стационарная}$$

матрица состояния, где  $\Delta t$  – временной интервал между измерениями;  $\vec{g}_k = [g_{1,k} \dots g_{L,k}]^T$  – вектор измерения;  $C$  – стационарная матрица измерения, состоящая из  $L$  строк вида  $[2(x_j - x_i) \ 2(y_j - y_i) \ 2(z_j - z_i) \ 0 \ 0 \ 0]$ ;  $i, j = 1, \dots, N$ ;  $i \neq j$ ;  $\vec{\xi}_k = [0 \ 0 \ 0 \ a_k^x \ a_k^y \ a_k^z]^T$  – вектор шума процесса,  $\vec{\xi}_k \sim \mathcal{N}(\vec{\xi}_k | \vec{0}, Q)$ ,  $Q = \text{diag}(0, 0, 0, \sigma_a^2, \sigma_a^2, \sigma_a^2)$  – стационарная матрица ковариации вектора шума процесса;  $\vec{\eta}_k$  – вектор шума измерения,  $\vec{\eta}_k \sim \mathcal{N}(\vec{\eta}_k | \vec{0}, R_k)$ ,  $R_k$  – матрица ковариации вектора шума измерения.

Оценка матрицы ковариации шума измерения базируется на подходе, описанном в работе [18]:

$$E[\vec{s}_k \vec{s}_k^T] = E[\vec{\eta}_k \vec{\eta}_k^T] - CP_k C^T,$$

где  $\vec{s}_k = \vec{g}_k - C\vec{x}_k$  – невязка, тогда

$$R_k = \begin{cases} R_0, & k < D, \\ \frac{1}{D} \sum_{d=k-D}^k \vec{s}_d \vec{s}_d^T + CP_k C^T, & k \geq D, \end{cases}$$

$D$  – ширина окна.

На этапе инициализации вектор состояния системы равен  $\vec{x}_0 = [x_0^m \ y_0^m \ z_0^m \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . Поскольку для оценки координат маяка используется линейная система уравнений (2), то начальный вектор координат ультразвукового маяка  $\vec{u}_0 = [x_0^m \ y_0^m \ z_0^m]^T$  можно вычислить, как псевдорешение этой системы  $[x_0^m \ y_0^m \ z_0^m]^T = (B^T B)^{-1} B^T \vec{g}_0$ . Матрица ковариации оценки состояния и матрица ковариации шума измерений равны  $P_0 = \text{diag}(\sigma_u^2, \sigma_u^2, \sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_v^2, \sigma_v^2)$ ,  $R_0 = \text{diag}(\underbrace{\sigma_g^2, \dots, \sigma_g^2}_{L \text{ элементов}})$ .

Полный алгоритм расчета оценки положения ведущего относительно ведомого транспортного средства с помощью фильтра Калмана представлен далее.

1 **входные данные:**  $\vec{x}_0, P_0, R_0, A, Q, C, D$

2 **выходные данные:**  $\vec{x}_k, P_k$

3 **начало**

4 **для**  $k = 1 \rightarrow K$

    Этап предсказания

5  $\vec{x}_{k|k-1} = A\vec{x}_{k-1}$

6  $P_{k|k-1} = AP_{k-1}A^T + Q$

    Этап коррекции

7  $\vec{s}_{k|k-1} = \vec{g}_k - C\vec{x}_{k|k-1}$

8  $G_k = P_{k|k-1}C^T(R_k + CP_{k|k-1}C^T)^{-1}$

9  $\vec{x}_k = \vec{x}_{k|k-1} + G_k\vec{s}_{k|k-1}$

10  $P_k = (I - G_kC)P_{k|k-1}$

11  $\vec{s}_k = \vec{g}_k - C\vec{x}_k$

12 **если**  $k < D$  **то**

13  $R_{k+1} = R_0$

14 **конец**

15 **иначе**

16  $R_{k+1} = \frac{1}{D} \sum_{d=k-D}^k \vec{s}_d \vec{s}_d^T + CP_k C^T$

17 **конец**

18 **конец**

19 **конец**

Ввиду того, что для точного воспроизведения траектории движения ведущего ведомым ТС необходима не только точечная оценка текущего положения ведущего, но и все предыдущие оценки, представляющие собой будущую траекторию ведомого, существует возможность применить алгоритм сглаживания Рауха – Тьюнга – Штрибеля. В отличие от фильтра Калмана алгоритм сглаживания использует обратную рекурсию, начиная от текущего положения ведущего и заканчивая последней интересующей ведомое ТС точкой, в которую ему необходимо попасть.

Для простоты описания алгоритма интересующие оценки вектора состояния  $\{\vec{x}_k, \vec{x}_{k-1}, \dots, \vec{x}_{k-T}\}$  и матрицы ковариации состояния  $\{P_k, P_{k-1}, \dots, P_{k-T}\}$  перенумерованы следующим образом:  $\{\vec{x}_T, \vec{x}_{T-1}, \dots, \vec{x}_0\}$ ,  $\{P_T, P_{T-1}, \dots, P_0\}$ . На этапе инициализации сглаженный вектор состояния  $\vec{x}_T^s = \vec{x}_T$  и его матрица ковариации  $P_T^s = P_T$  [19].

Полный алгоритм уточнения интересующего участка траектории движения ведущего с помощью алгоритма сглаживания Рауха – Тьюнга – Штрибеля представлен ниже.

1	<b>входные данные:</b>	$\{\bar{x}_T, \bar{x}_{T-1}, \dots, \bar{x}_0\}, \{P_T, P_{T-1}, \dots, P_0\}, A, Q, T$
2	<b>выходные данные:</b>	$\{\bar{x}_T^s, \bar{x}_{T-1}^s, \dots, \bar{x}_0^s\}, \{P_T^s, P_{T-1}^s, \dots, P_0^s\}$
3	<b>начало</b>	
4	для $t = T \rightarrow 0$	
5	$\bar{x}_{t+1 t} = A\bar{x}_t$	
6	$P_{t+1 t} = AP_tA^T + Q$	
7	$S_t = P_tA^T P_{t+1 t}^{-1}$	
8	$\bar{x}_t^s = \bar{x}_t + S_t(\bar{x}_{t+1}^s - \bar{x}_{t+1 t})$	
9	$P_t^s = P_t + S_t(P_{t+1}^s - P_{t+1 t})S_t^T$	
10	<b>конец</b>	
11	<b>конец</b>	

С учетом предыдущих исследований [20] было выявлено, что фильтр Калмана с последующим сглаживанием по алгоритму Рауха – Тунга – Штрибеля обеспечивает высокую точность оценки траектории движения ведущего и наряду с этим имеет невысокую вычислительную сложность.

#### **Увеличение дальности работы информационно-измерительного комплекса**

По сравнению с другими информационно-измерительными комплексами комплекс, основанный на использовании ультразвуковых датчиков, обладает рядом преимуществ, среди которых можно отметить возможность использования при любых погодных условиях, включая густой туман или любого рода осадки. Помимо этого, комплекс работоспособен внутри и вне помещений, а факт того, что в полосе частот, соответствующих ультразвуковому излучению, достаточно мало акустических помех, положительно влияет на точность и стабильность оценки положения ведущего.

Основным недостатком информационно-измерительного комплекса является дальность работы, ограниченная 20 метрами. Обусловлено это тем, что мощность ультразвуковой волны обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника. Таким образом, с увеличением дистанции между активным маяком и пространственной решеткой приемников, амплитуда сигнала падает, что усложняет процесс детектирования момента прибытия ультразвуковой волны. Кроме того, максимальное расстояние между ведущим и ведомым зависит от частоты измерений, производимых информационно-измерительным комплексом. Зависимость можно выразить как

$$D_{\max} = \left( \frac{1}{f_s} - \tau_o \right) c,$$

где  $D_{\max}$  – максимальное расстояние между маяком и пространственной решеткой ультразвуковых приемников;  $c$  – скорость распространения ультразвука в воздухе;  $\tau_o$  – время обработки и передачи результатов измерений. При параллельной работе таймера измерения времени пролета и цифрового интерфейса связи значением  $\tau_o$  можно пренебречь.

При участии в автономном караване мало- и среднегабаритных роботизированных комплексов поддерживаемая дистанция между ведущим и ведомым обычно составляет от 5 до 10 метров, и недостаток информационно-измерительного комплекса, основанного на ультразвуковых датчиках, становится несущественным.

Если в автономном караване участвуют крупногабаритные роботизированные ТС, такие как автономные грузовые машины, то на открытых территориях, например дорогах общего пользования, в некоторые моменты времени существует потребность в увеличении максимального расстояния между ведущим и ведомым ТС. Одним из способов достижения указанного является введение в состав активного маяка ГНСС-приемника и использование его оценки положения ведущего при выходе последнего из зоны видимости ультразвуковых приемников. Точность оценки положения ГНСС-приемников без использования вспомогательного оборудования, такого как, например, статические базовые станции, используемые в кинематических системах реального времени (RTK), достаточно мала.

Альтернативным вариантом увеличения точности ГНСС-оценки, заключающимся в компенсации смещения, возникающего с течением времени, является вычисление корректирующих поправок с помощью более точных данных, получаемых с пространственной решетки ультразвуковых приемников, когда маяк находится в области видимости решетки (рис. 2).



Рис. 2. Компенсация смещения оценки ГНСС  
 Fig. 2. Compensation of GNSS estimation drift

Компенсация смещения достигается путем прибавления к оценке положения ГНСС-приемника корректирующих поправок  $\vec{c}_k$ , вычисленных по формуле

$$\vec{c}_k = \vec{x} - \vec{x}_k^G,$$

где  $\vec{x}_k^G$  – ГНСС-оценка положения маяка в локальной системе координат ведомого робота на  $k$ -м шаге алгоритма.

**Экспериментальные исследования**

При экспериментальном исследовании была реализована траектория движения ведущего таким образом, что дистанция между ведущим и ведомым ТС в некоторые моменты времени превышала область видимости пространственной решетки, при этом вычислялась оценка ГНСС-приемника без использования и с использованием корректирующих поправок. Поскольку оценка положения ведущего ГНСС-приемником выдается в географических координатах, для корректного комбинирования данных ГНСС-приемника и пространственной решетки ультразвуковых приемников географические координаты переводятся в локальную систему координат ведомого ТС.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Серым цветом выделена область видимости пространственной решетки ультразвуковых приемников.

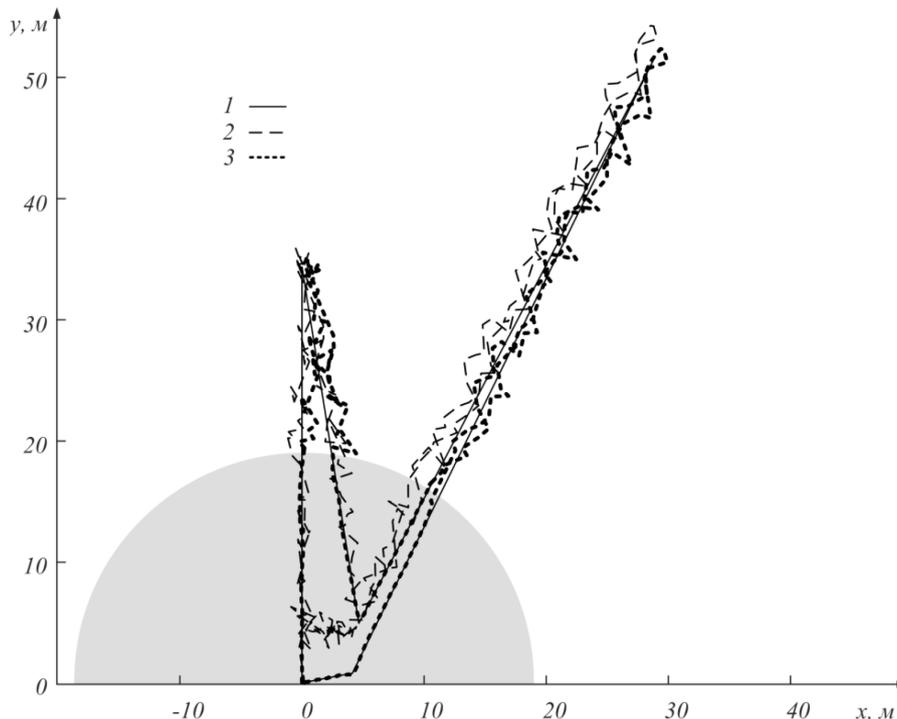


Рис. 3. Оценка траектории движения маяка, оснащенного приемником ГНСС: 1 – образцовая траектория движения маяка; 2 – оценка траектории движения маяка по данным ГНСС-приемника; 3 – комбинированная оценка движения маяка по данным ультразвуковых приемников и скорректированным данным ГНСС-приемника

Fig. 3. Estimation of the trajectory of a beacon equipped with a GNSS receiver: 1 - reference trajectory of the beacon; 2 - estimation of the trajectory of the beacon according to GNSS receiver data; 3 - combined estimation of the beacon movement according to ultrasonic receivers and corrected GNSS receiver data

Для каждой полученной траектории движения была рассчитана динамическая погрешность, вычисляемая как расстояние между оцен-

кой траектории движения ведущего и образцовой траекторией в пространстве  $|\Delta_3|$  (рис. 4).

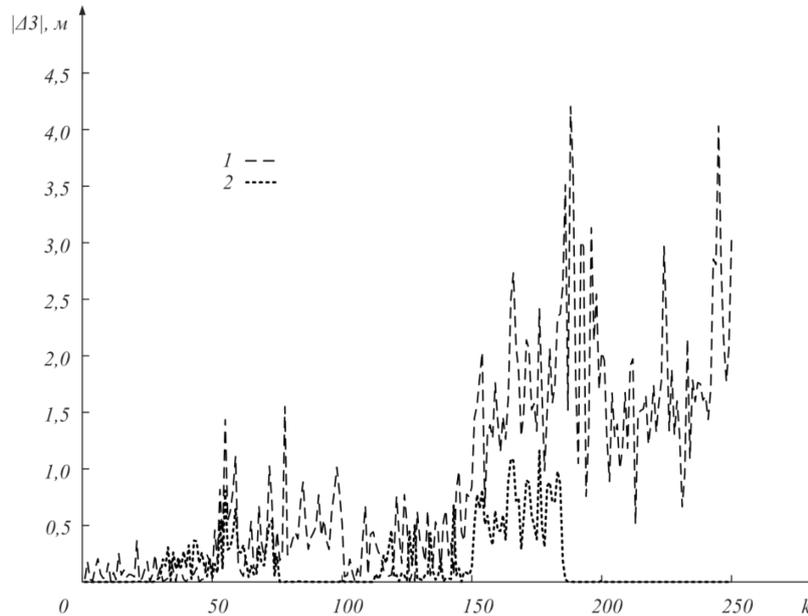


Рис. 4. Динамическая погрешность: 1 – оценки траектории движения маяка по данным ГНСС-приемника; 2 – комбинированная оценки движения маяка по данным ультразвуковых приемников и скорректированным данным ГНСС-приемника

Fig. 4. Dynamic error: 1 - estimates of beacon trajectory according to GNSS receiver data; 2 - combined estimates of beacon movement according to ultrasonic receivers and corrected GNSS receiver data

Как видно из рис. 1, на графике динамической погрешности результирующей оценки траектории имеются области с малым значением погрешности, которые соответствуют моменту нахождения ведущего в области видимости пространственной решетки ультразвуковых приемников ведомого. В моменты выхода ведущего за пределы зоны видимости динамическая погрешность меньше в результате введения корректирующих поправок в оценку ГНСС-приемника.

Среднеквадратическое отклонение оценки положения ведущего ГНСС-приемником и результирующей оценки представлено в таблице.

**СКО-оценки положения ведущего ГНСС-приемником и результирующей оценки  
RMS of the master GNSS position estimation by the receiver and the resulting estimation**

Параметр	СКО ( $ \Delta_3 $ ), м
Оценка траектории движения ведущего по данным ГНСС-приемника	3,01
Комбинированная оценка траектории движения ведущего по данным ультразвуковых приемников и скорректированным данным ГНСС приемника	1,25

Корректирующие поправки уменьшают систематическую составляющую погрешности ГНСС-приемника, не влияя на случайную со-

ставляющую. Помимо этого, при длительном нахождении ведущего вне зоны видимости ультразвуковых приемников положительный эффект, вносимый поправками, снижается. Часто во многих приложениях автономного караванного вождения при выходе ведущего за пределы круга радиусом 20 м с центром, в котором находится ведомый, достаточно лишь грубой оценки пеленга ведущего. Именно эта оценка и используется для управления движением ведомого до тех пор, пока ведущий не окажется в пределах 20-метровой зоны и управление ведомым вернется в режим воспроизведения точной оценки траектории движения ведущего.

**Заключение**

В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что комбинированная оценка траектории движения ведущего по данным пространственной решетки ультразвуковых приемников и ГНСС-приемника до двух раз точнее, чем оценка траектории движения ведущего по данным ГНСС-приемника. За счет введения ГНСС-приемника в состав информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС расширяется рабочий диапазон комплекса до радиуса действия радиопередатчика в составе маяка на открытых участках местности. Помимо этого,

комбинирование данных ГНСС-приемника и пространственной решетки ультразвуковых приемников позволяет роботизированным ТС непрерывно функционировать при переходе с открытых участков местности в урбанизированные или полностью закрытые зоны при сокращении дистанции между ведущим и ведомым до радиуса видимости пространственной решетки, что является преимуществом по сравнению с существующими системами.

Результаты исследований открыли перспективы увеличения точности оценки информационно-измерительного комплекса в недетерминированных средах при превышении 20-метровой дистанции между ведущим и ведомым ТС за счет использования в комплексе метода динамического кинематического позиционирования в реальном времени (DRTK – Dynamic base Real Time Kinematic).

#### Библиографические ссылки

1. Zhang C., Noguchi N., Yang L. Leader – follower system using two robot tractors to improve work efficiency // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. T. 121. С. 269–281.
2. Tabb T. T., Martin S. M., Bevely D. Improved relative positioning for path following in autonomous convoys // Proceedings of the Ground Vehicles Systems Engineering and Technology Symposium. Pp. 7-9.
3. Travis W., Bevely D. M. Trajectory duplication using relative position information for automated ground vehicle convoys // 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. IEEE, 2008. Pp. 1022-1032.
4. Zhao C. et al. An RGBD data based vehicle detection algorithm for vehicle following systems // 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2013. Pp. 1506-1511.
5. Cowan N. et al. Vision-based follow-the-leader // Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453). IEEE, 2003. Vol. 2. С. 1796-1801.
6. Wen Y. J. et al. Infrared sensor based target following device for a mobile robot // 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2011. Pp. 49-54.
7. Han W., Chin Y. T. Target tracking and pursue using laser scanner // 2nd Asian symposium on Industrial Automation and Robotics BITEC. 2001.
8. Choi J. et al. Multi-target tracking using a 3d-lidar sensor for autonomous vehicles // 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). IEEE, 2013. Pp. 881-886.
9. Kim M. et al. RFID-enabled target tracking and following with a mobile robot using direction finding antennas // 2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2007. Pp. 1014-1019.
10. Perez M. C. et al. Performance comparison of different codes in an ultrasonic positioning system using DS-CDMA // 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. IEEE, 2009. Pp. 125-130.
11. Chen Y., Yao Z., Peng Z. A Novel Method for Asynchronous Time-of-Arrival-Based Source Localization: Algorithms, Performance and Complexity // Sensors. 2020. Vol. 20. No. 12. P. 3466.
12. Chen C. et al. Target-tracking and path planning for vehicle following in jungle environment // ICARCV 2004 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. IEEE, 2004. Vol. 1. Pp. 455-460.
13. Fries C., Wuensche H. J. Autonomous convoy driving by night: The vehicle tracking system // 2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA). IEEE, 2015. Pp. 1-6.
14. Барабанов О.О., Барабанова Л. П. Математические задачи дальномерной навигации. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 272 с. ISBN 978-5-9221-0874-4.
15. G Yang, L Zhao, Y Dai, Y Xu A KFL-TOA UWB indoor positioning method for complex environment // 2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2017. Pp. 3010-3014.
16. Рудых А. А., Сартусон А. В. Система локализации мобильного робота в помещениях с использованием ультразвуковой системы навигации и фильтра Калмана // Автоматизация и управление в машиностроении. 2017. № 1. С. 31–37.
17. Hartikainen J and Sumo S. Optimal filtering with Kalman filters and smoothers, A Manual for the Matlab toolbox EKF/UKF, Department of Biomedical Engineering and Computational Science, Aalto University School of Science, Espoo, Finland, August 2011, p.129.
18. Wang J, Ding W and Wang J. Improving adaptive Kalman filter in GPS/SDINS integration with neural network, Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, TX, USA, 25-28 September 2007, vol. 1, pp. 571-579.
19. Сопоставление методов фильтрации в задачах статистической регуляризации при оценивании параметров радиолокационных систем / О. О. Ситник и др. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия системный анализ и информационные технологии. 2013. № 1. С. 10–16.
20. Goll S., Zakharova E. An active beacon-based tracking system to be used for mobile robot convoying // 21th International Symposium on Measurement and Control in Robotics. 2018. Pp. 18-24.

#### References

1. Zhang C., Noguchi N., Yang L. Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 121. Pp. 269-281.
2. Tabb T.T., Martin S.M., Bevely D. Improved relative positioning for path following in autonomous convoys // Proceedings of the Ground Vehicles Systems Engineering and Technology Symposium. Pp. 7-9.
3. Travis W., Bevely D.M. Trajectory duplication using relative position information for automated ground vehicle convoys // 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. IEEE, 2008. C. 1022-1032.
4. Zhao C. et al. An RGBD data based vehicle detection algorithm for vehicle following systems // 2013

IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2013. Pp. 1506-1511.

5. Cowan N. et al. Vision-based follow-the-leader [Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems] (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). IEEE, 2003. Vol. 2. Pp. 1796-1801.

6. Wen Y.J. et al. Infrared sensor based target following device for a mobile robot // 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2011. Pp. 49-54.

7. Han W., Chin Y.T. Target tracking and pursue using laser scanner // 2nd Asian symposium on Industrial Automation and Robotics BITEC. 2001.

8. Choi J. et al. Multi-target tracking using a 3d-lidar sensor for autonomous vehicles //16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). IEEE, 2013. Pp. 881-886.

9. Kim M. et al. RFID-enabled target tracking and following with a mobile robot using direction finding antennas // 2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2007. Pp. 1014-1019.

10. Perez M.C. et al. Performance comparison of different codes in an ultrasonic positioning system using DS-CDMA // 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. IEEE, 2009. Pp. 125-130.

11. Chen Y., Yao Z., Peng Z. A Novel Method for Asynchronous Time-of-Arrival-Based Source Localization: Algorithms, Performance and Complexity // Sensors. 2020. Vol. 20. No. 12. P. 3466.

12. Chen C. et al. Target-tracking and path planning for vehicle following in jungle environment // ICARCV 2004 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. IEEE, 2004. Vol. 1. Pp. 455-460.

13. Fries C., Wuensche H.J. Autonomous convoy driving by night: The vehicle tracking system // 2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA). IEEE, 2015. Pp. 1-6.

14. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Matematicheskie zadachi dal'nomernoi navigatsii [Mathematical problems of rangefinder navigation]. Moscow: FIZMATLIT, 2007. 272 p. ISBN 978-5-9221-0874-4 (in Russ.).

15. Yang G., Zhao L., Dai Y., Xu Y. A KFL-TOA UWB indoor positioning method for complex environment // 2017 Chinese Automation Congress (CAC). – IEEE, 2017. – C. 3010-3014.

16. Rudykh A.A., Sartison A.V. [Mobile robot localization system in the premises using ultrasonic navigation system and Kalman filter]. Automation and control in mechanical engineering. 2017. No. 1. Pp. 31-37 (in Russ.).

17. Hartikainen J and Sumo S. Optimal filtering with Kalman filters and smoothers A Manual for the Matlab toolbox EKF/UKF, Department of Biomedical Engineering and Computational Science, Aalto University School of Science, Espoo, Finland, August 2011, p.129.

18. Wang J., Ding W. and Wang J. Improving adaptive Kalman filter in GPS/SDINS integration with neural network, Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, TX, USA, 25-28 September 2007, vol. 1, pp. 571-579.

19. Sitnik O.O. et al. [Comparison of Filtering Methods in Statistical Regularization Problems in Estimation of Radar System Parameters]. Vestnik of Voronezh State University. Series of System Analysis and Information Technologies. 2013. No. 1. Pp. 10-16 (in Russ.).

20. Goll S., Zakharova E. An active beacon-based tracking system to be used for mobile robot convoying // 21th International Symposium on Measurement and Control in Robotics. 2018. Pp. 18-24.

\*\*\*

### Combined Estimation of the Mutual Position of the Master and Slave Vehicle by Ultrasonic Receivers and Gnss-Module Data

S. A. Goll, PhD in Engineering, Associate professor, RSREU named after V. F. Utkin, Ryazan, Russia  
E. A. Zakharova, Senior Lecturer, RSREU named after V. F. Utkin, Ryazan, Russia

*The problem of determining the position of master vehicle when implementing a scenario of robotic vehicle as a part of caravanning driving system is studied. The mentioned scenario is expected the slave vehicle to replicate the motion trajectory of master vehicle represented by human operated vehicle, by another robotic vehicle or by human operator. To provide reliable operation of robotic vehicle within autonomous convoy a reliable and precise assessment of master vehicle position and trajectory regardless of environment is required.*

*Implementation of ultrasonic receivers and emitters within information and measurement complex to determine master-slave vehicle mutual position allows to function at any time of the day inside and outside the premises in the presence of dynamic obstacles, smoke, precipitation, etc. Estimation of position and trajectory of master vehicle is accomplished by means of measuring arrival time of ultrasonic wave emitted by active beacon prior to spatial array of ultrasonic receivers. Similar indirect distance measurement between beacon and each receiver allowed to receive a system of equations to be solved by implementation of Kalman filter with Raugh – Tung – Striebel smoother.*

*Major disadvantage of the approach is 20-meter range, which is enough for complex maneuvering. To increase the range of the complex operation, a combined estimation of the master's position based on measuring data of the spatial array of ultrasonic receivers and the module of global navigation satellite system is proposed.*

**Keywords:** autonomous convoy, information and measurement complex, robotic vehicle, ultrasonic beacon, spatial array of ultrasonic receivers, master position estimation, global navigation satellite system receiver, dynamic error.