

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 623.593

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент
Институт механики УрО РАН
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
И. В. Коробейникова, кандидат технических наук, доцент
А. В. Коробейников, кандидат технических наук, доцент
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ТОЧНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ МИШЕНИ, ИНВАРИАНТНОЙ К РАБОЧЕЙ ПОЗИЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Приведены результаты исследований математической модели сверхзвуковой акустической мишени, инвариантной к направлению стрельбы. Выявлена зависимость погрешности определения параметров стрельбы от погрешности задания координат датчиков и от погрешности определения времен их срабатывания, не влияющая на идентификацию рабочей позиции.

Ключевые слова: акустическая мишень, погрешность, инвариантность.

Акустические мишени, применяемые на производстве для определения параметров кучности и меткости стрелкового оружия, как правило, не инвариантны к направлению стрельбы. Мишень обычно настраивается для работы с конкретной рабочей позиции, а если требуется выполнять стрельбу с другого места, то меняются настройки в программном обеспечении. Это усложняет эксплуатацию мишени, поэтому создание мишени, инвариантной к направлению стрельбы, упростит ее обслуживание и даст возможность вести стрельбу с любой точки тира [1–4], а значит, повысит точность фиксации точки попадания [5, 6]. При этом немаловажно оценить и проанализировать влияние погрешностей на определение параметров стрельбы (например, координат точки попадания, скорости пули, углов курса и бросания) при испытаниях с различных позиций.

Акустические датчики на несущей конструкции сверхзвуковой мишени (рис. 1) расположены вокруг области регистрации таким образом, чтобы их взвешенные времена срабатывания [7] на образующуюся вокруг пули ударную волну (конус Маха) могли быть измерены виртуальным цифровым осциллографом [8], и по ним рассчитаны координаты точки попадания и скорость пули.

Математическая модель стрельбы [9], должна обеспечивать определение не только координат точки попадания (ТП), но и угла направления (курса) стрельбы. При этом считается, что траектория пули в зоне регистрации представляет собой прямую линию (касательную к истинной траектории пули), проходящую через ТП под углом наклона θ_1 и углом курса ψ , значения которых и подлежат определению (рис. 1–2). В ранних же моделях мишени [10] траектория представлялась прямой, проходящей через ТП и параллельно оси X , такое упрощение вносило существенные погрешности в работу мишени при отклонениях рабочей позиции при испытаниях.

Движение пули в плоскости стрельбы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений [11]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -cH(y)G(v); \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2}; \\ \frac{dy}{dx} &= \gamma = \operatorname{tg}\theta; \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u}; \quad v = u\sqrt{1+\gamma^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u = v\cos\vartheta$ – проекция скорости на ось Ox^* ; $\gamma = \operatorname{tg}\vartheta$ – тангенс угла наклона вектора скорости; y, x – координаты центра массы пули; t – время движения пули по траектории; $G(v)$ – функция сопротивления по закону 1943 года; c – баллистический коэффициент пули; g – ускорение свободного падения; $H(y) = 1$ – в случае настильных траекторий (в тире).

Интегрируя (1) из ТП в обратном направлении и из условия попадания в точку позиции стрелка (координаты позиции заданы), можно получить значения начальной скорости пули, угла бросания и баллистического коэффициента c .

Точка же попадания определяется исходя из математической модели сверхзвуковой акустической мишени [12]:

$$\sqrt{(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - \frac{va(t_i - t_0)}{\sqrt{v^2 - a^2}} = 0, \quad (2)$$

где y_0, z_0 – координаты точки попадания; y_i, z_i – координаты i -го датчика; $i = 1, \dots, 6$; v – скорость пули в зоне срабатывания датчиков; a – скорость звука; t_0 – момент времени начала отсчета (время пересечения пулей плоскости регистрации); t_i – момент времени фиксации сигнала на i -м датчике.

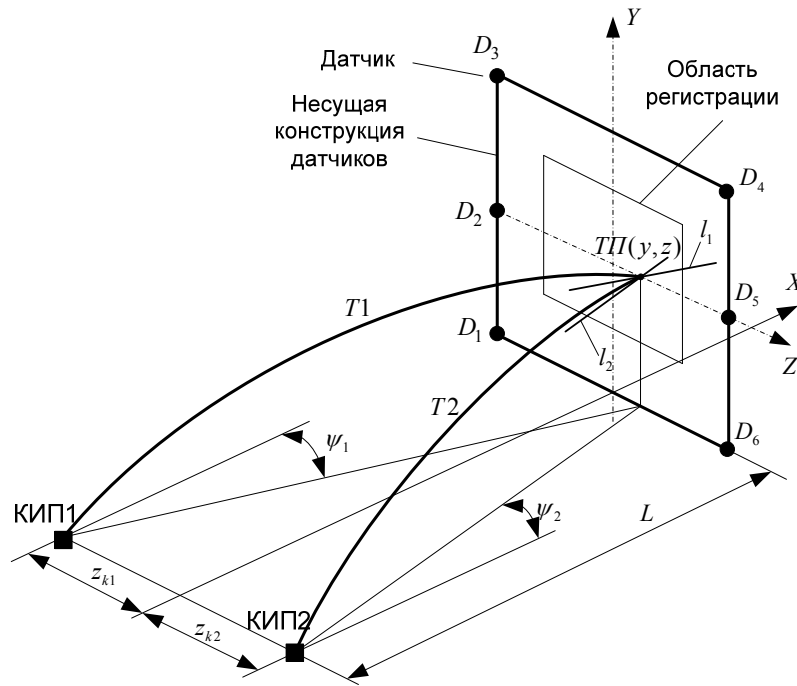


Рис. 1. Контрольно-испытательные посты и акустическая мишень: КИП1, КИП2 – контрольно-испытательные посты; D_i – датчики ($i = 1, \dots, 6$); $ТП(y, z)$ – точка попадания с координатами (y, z) ; l_1, l_2 – линии, аппроксимирующие траектории $T1$ и $T2$

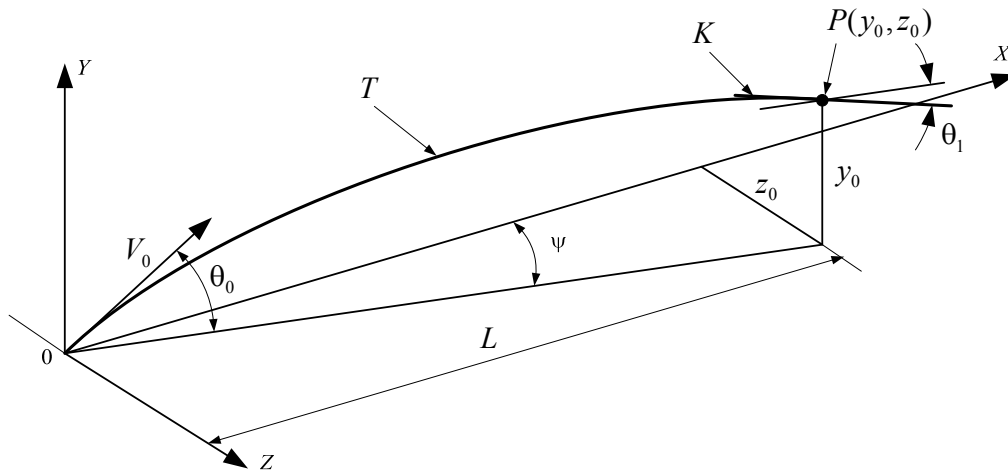


Рис. 2. Траектория пули, проходящая через точку $P(y_0, z_0)$: V_0 – начальная скорость; T – траектория; ψ – угол курса; θ_0 – угол бросания; K – касательная к траектории в ТП; θ_1 – угол падения; L – дальность

Инвариантность в модель вносится преобразованием координат для совмещения оси Ox с касательной к траектории пули в ТП и считая постоянство скорости пули после ТП. Получаем для каждого датчика:

$$t_i = \frac{\sqrt{(y_i^*)^2 + (z_i^*)^2} - x_i^*}{v} + t_0, \quad (3)$$

где t_i – время срабатывания i -го датчика;

$$\begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \\ 1 \end{bmatrix} = McdMyMz \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad x_i, y_i, z_i \text{ – координаты } i\text{-го}$$

датчика, $i = 1 \dots 6$; v – скорость пули в зоне срабатывания датчиков; t_0 – начало отсчета времени.

Матрицы преобразования координат имеют вид [13]:

$$Mcd = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -dx \\ 0 & 1 & 0 & -dy \\ 0 & 0 & 1 & -dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, My = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$Mz = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где Mcd – матрица сдвига; dx, dy, dz – величины сдвигов соответственно в направлении осей X , Y и Z ; M_y, M_z – матрицы поворотов соответственно вокруг осей Y и Z ; ψ – угол поворота системы вокруг оси Y ; θ_1 – угол поворота вокруг оси Z .

Неизвестными в этой системе уравнений (2) с учетом (3) являются $z_0, y_0, v, \psi, \theta_1, t_0$, что и требует не менее 6 акустических датчиков на мишени (рис. 1). Как видно, модель позволяет определить кроме координат ТП скорость пули в этой точке, а также угол наклона траектории и угол курса, т. е. она позволяет определить направление прилета пули, что может быть использовано при построении информационно-измерительных систем, обеспечивающих одновременную стрельбу из разных позиций в одну мишень.

При исследовании инвариантной математической модели мишени в пакете Mathcad основной задачей является определение влияния погрешностей в координатах расположения датчиков и временах их срабатывания на точность определения параметров выстрела (координаты ТП, текущая скорость пули, углы курса и бросания) при стрельбе, например, с трех разных позиций. Все позиции расположены на одинаковом от плоскости регистрации расстоянии, равном 100 м, а по боку и высоте они имеют следующие координаты: $z_0 = -15$ м, $y_0 = 1$ м, $z_1 = 0$ м, $y_1 = 0$ м, $z_2 = 15$ м, $y_2 = -1$ м.

Сначала для каждой из 9 (3×3) характерных точек в плоскости регистрации и каждой позиции стрелка путем интегрирования системы дифференциальных уравнений (1), описывающих движение пули по траектории, были определены времена срабатывания датчиков. Затем решалась серия обратных задач, т. е. сначала в матрицу точных координат датчиков, а потом в матрицу точных времен на каждом цикле вносились погрешности по нормальному закону и вычислялись координаты ТП, скорость пули и углы курса и наклона. Далее вычислялись и запоминались погрешности этих параметров и определялось среднее квадратическое отклонение каждого параметра.

Графики влияния погрешностей в координатах датчиков на точность определения некоторых параметров [14] показаны на рис. 3–7.

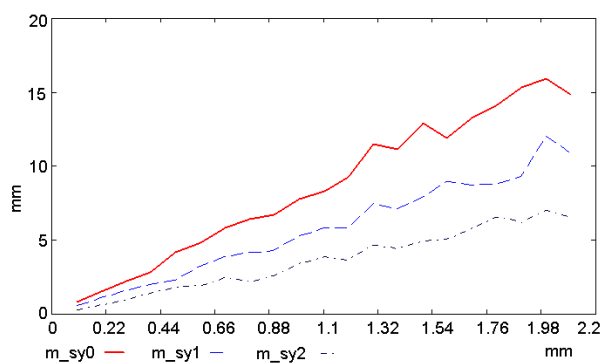


Рис. 3. Влияние СКО вносимых погрешностей в координатах датчиков на определение координаты y : $m_{sy_0}, m_{sy_1}, m_{sy_2}$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

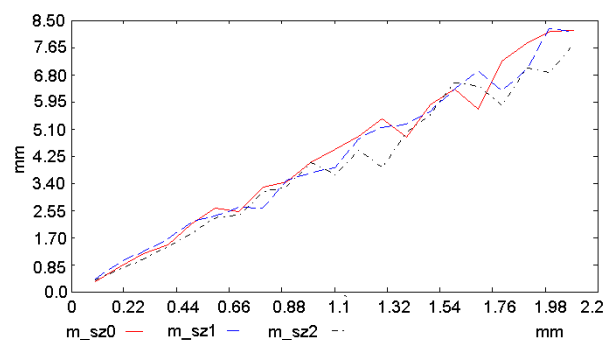


Рис. 4. Влияние СКО вносимых погрешностей в координатах датчиков на определение координаты z : $m_{sz_0}, m_{sz_1}, m_{sz_2}$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

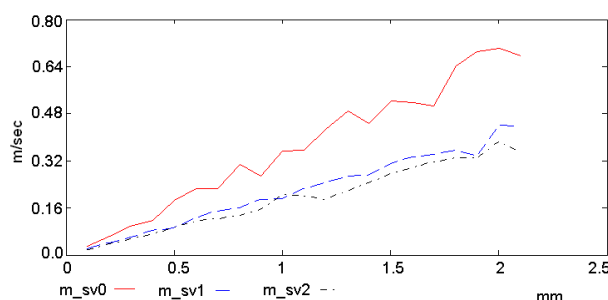


Рис. 5. Влияние СКО вносимых погрешностей в координатах датчиков на определение скорости: $m_{sv_0}, m_{sv_1}, m_{sv_2}$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

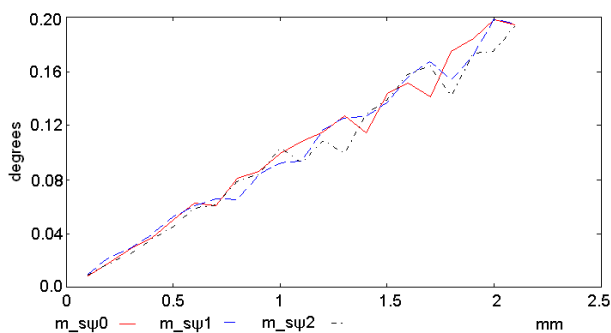


Рис. 6. Влияние СКО вносимых погрешностей в координатах датчиков на определение угла курса: $m_{s\psi_0}, m_{s\psi_1}, m_{s\psi_2}$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

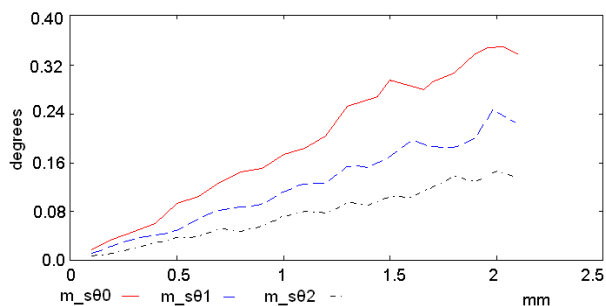


Рис. 7. Влияние СКО вносимых погрешностей в координатах датчиков на определение угла бросания: $m_{s\theta_0}, m_{s\theta_1}, m_{s\theta_2}$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

Графики влияния погрешностей во временах срабатывания датчиков на точность определения некоторых параметров показаны на рис. 8–12.

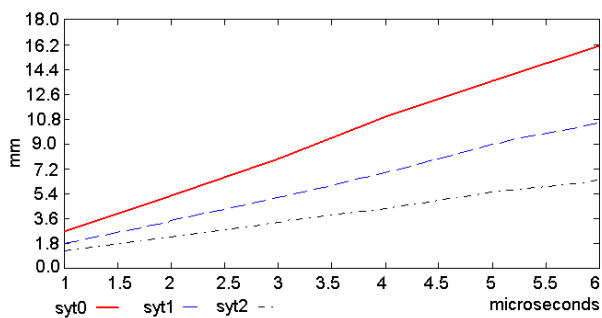


Рис. 8. Влияние СКО вносимых погрешностей во времена датчиков на определение координаты y : syt_0, syt_1, syt_2 – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

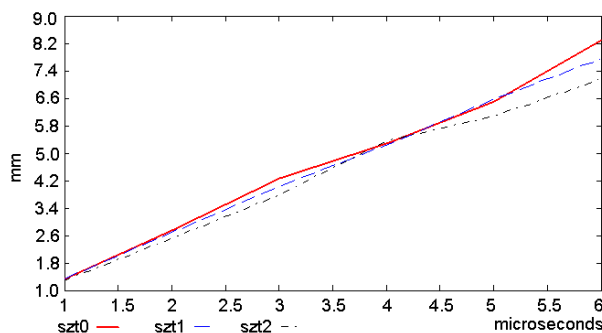


Рис. 9. Влияние СКО вносимых погрешностей во времена датчиков на определение координаты z : szt_0, szt_1, szt_2 – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

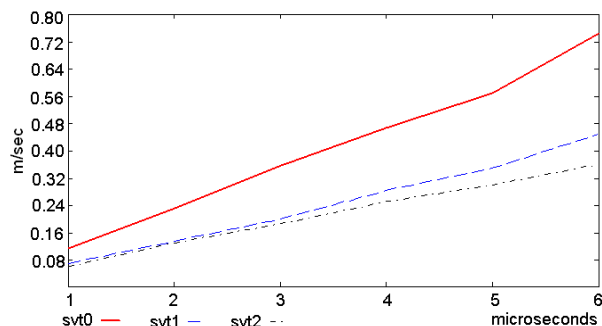


Рис. 10. Влияние СКО вносимых погрешностей во времена датчиков на определение скорости: svt_0, svt_1, svt_2 – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

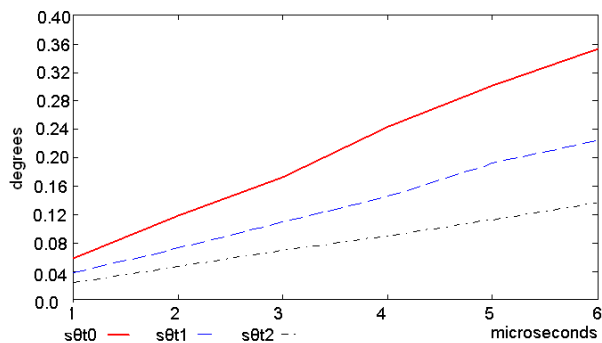


Рис. 11. Влияние СКО вносимых погрешностей во времена датчиков на определение угла бросания: $s\theta t_0, s\theta t_1, s\theta t_2$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

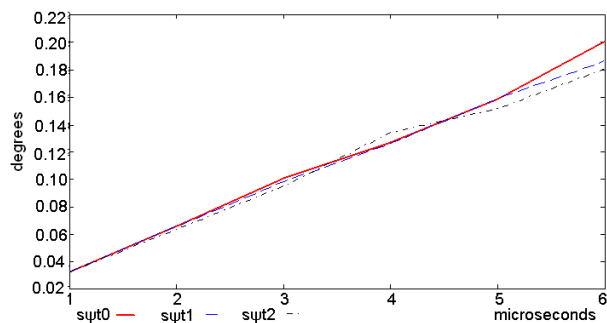


Рис. 12. Влияние СКО вносимых погрешностей во времена датчиков на определение угла курса: $s\psi t_0, s\psi t_1, s\psi t_2$ – погрешности при стрельбе с постов 0, 1 и 2

Анализ результатов исследований показывает:

- 1) акустическая мишень практически инвариантна к позиции стрелка;
- 2) координата z рассчитывается приблизительно в 2 раза точнее, чем координата y . Такой эффект объясняется тем, что большая часть датчиков расположена по бокам несущей конструкции (рис. 1);
- 3) точность определения скорости пули значительно выше по сравнению с ранними математическими моделями [15];
- 4) вычисление угла курса позволяет упростить определение принадлежности выполненного выстрела конкретному стрелку (а определение точки вылета пули несет в себе значительный военный потенциал).

Библиографические ссылки

1. Математическая модель универсальной сверхзвуковой акустической мишени / В. В. Коробейников [и др.] // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 101–103.
2. Варианты моделей акустических мишеней / В. В. Коробейников [и др.] // Вестник КИГИТ. – 2012. – № 1 (19). – С. 18–23.
3. Акустическая мишень с выносным датчиком / В. В. Коробейников [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013 – № 1. – С. 127–129.
4. Пат. 2392577 Российская Федерация, МПК F41 J 5/06. Устройство определения внешнебаллистических параметров на основе акустических датчиков / Афанасьев Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В., Коробейников В. В.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. – № 2008129855/02; заявл. 18.07.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17-ил.
5. Повышение точности акустической мишени за счет использования взвешенных моментов времени / С. Ф. Егоров [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 105–108.
6. Исследование влияния погрешностей в сверхзвуковой акустической мишени на точность определения координат точек попадания / Д. Н. Белоусов [и др.] // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. регион. НТК. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2014. – С. 320–324.
7. Повышение точности акустической мишени за счет использования взвешенных моментов времени / С. Ф. Егоров [и др.]. С. 105–108.
8. Акустическая мишень с выносным датчиком / В. В. Коробейников [и др.]. С. 127–129.

9. Варианты моделей акустических мишеней / В. В. Коробейников [и др.]. С. 18–23.

10. Пат. 2392577 Российская Федерация, МПК F41 J 5/06. Устройство определения внешнебаллистических параметров на основе акустических датчиков / Афанасьева Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В., Коробейников В. В.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. – № 2008129855/02; заявл. 18.07.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17-ил.

11. Варианты моделей акустических мишеней / В. В. Коробейников [и др.]. С. 18–23.

12. Там же.

13. Исследование влияния погрешностей в сверхзвуковой акустической мишени на точность определения координат точек попадания / Д. Н. Белоусов [и др.]. С. 320–324.

14. Там же.

15. Пат. 2392577 Российская Федерация, МПК F41 J 5/06. Устройство определения внешнебаллистических параметров на основе акустических датчиков / Афанасьева Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В., Коробейников В. В.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. – № 2008129855/02; заявл. 18.07.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17-ил.

Egorov S. F., PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Korobeynikova I. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Korobeynikov A. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Research for the influence of mathematical model invariant to working position on the accuracy of an acoustic target

Results of research for the mathematical model of a supersonic acoustic target invariant to firing direction are given. The dependence is revealed regarding the error of determining the parameters of firing on the error of assigning the coordinates of sensors and on the error of defining the instants of their operation, this dependence not influencing the identification of the working position.

Keywords: acoustic target, error, invariancy.

Получено: 30.09.15