

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 623.593; 681.31; 004.021

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент
Институт механики УрО РАН
В. С. Казаков, кандидат технических наук, профессор
В. А. Афанасьев, кандидат технических наук
И. Г. Корнилов, кандидат технических наук
И. В. Коробейникова, кандидат технических наук
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Приведена история совершенствования математических моделей сверхзвуковых акустических мишеней для стрелкового оружия на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и в Институте механики УрО РАН за 25 лет. Электронные акустические мишени широко используются для испытания и диагностики стрелкового и артиллерийского оружия на производствах и военных приемках и для повышения их точности. Исследованы модели мишеней с различным размещением акустических датчиков, мишени, инвариантные к позиции стрельбы, и мишени, работающие на открытом воздухе при ветреной обстановке. В каждой модели проанализированы обоснованные упрощения физических процессов. Показаны основные факторы, влияющие на точность определения точки попадания. Приведены математические и конструкторские методы по снижению погрешностей работы акустической мишени, такие как несимметричное расположение акустических датчиков на рамной конструкции для невырождения системы уравнений, использование взвешенных моментов времени при обработке сигналов с датчиков для инвариантности ориентации датчиков, учет умеренного ламинарного ветра при испытаниях на открытом воздухе путем обоснованного усложнения математической модели и увеличения количества датчиков, учет угла курса и угла падения траектории объекта в пространстве мишени для определения точки вылета путем преобразования координат в математической модели, использование вторичной регрессионной математической модели для уменьшения неучтенных погрешностей. Сделан вывод о перспективности дальнейших исследований и усовершенствований математических моделей сверхзвуковых электронных акустических мишеней с целью повышения их точности и снижения себестоимости.

Ключевые слова: акустическая мишень, акустический датчик, погрешность, система уравнений, измерительная система, математическая модель.

Электронные акустические мишени, разработкой и исследованием которых занимались в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и в Институте механики УрО РАН, применяются на производстве для определения параметров кучности и меткости стрелкового оружия или в структурах МО РФ для военной приемки или в качестве боевых тренажеров и состоят из ряда смонтированных по периметру мишени акустических датчиков (рис. 1). Датчики реагируют на звукобаллистическую волну (конус Маха) от пролетающего выше скорости звука объекта, и по времени прихода волны до датчиков (D_i) однозначно определяются координаты попадания в мишень решением системы уравнений. Акустические мишени являются системами косвенных измерений, когда точка попадания (ТП) определяется по фиксации функционально связанных с ней параметров выстрела (в данном случае с моментами времени встречи фронта звуковой волны с акустическими датчиками, т. е. с временами прихода сигналов с акустических датчиков). Таким образом, решается обратная задача, т. е. по модели (уравнениям) вычисляются координаты и скорость. При этом в дозвуковых мишенях (со скоростью пролета объектов до 500 м/с), когда полноценный конус Маха не образуется, применяется преобразующее механическое устройство перед датчиками в виде резиновой многообразной плоскости [1–2].

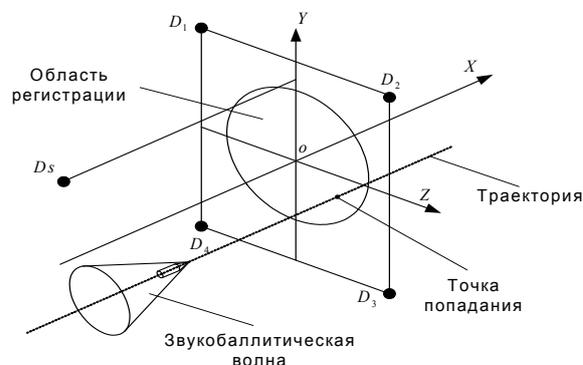


Рис. 1. Конструкция акустической мишени

Точка попадания определяется, например, исходя из первой и самой простой математической модели сверхзвуковой акустической мишени, в которой траектория пролета объекта в объеме мишени считается прямолинейной, равномерной и перпендикулярной передней плоскости мишени, все датчики расположены в плоскости мишени, координата x ТП не рассчитывается, а расстояние от акустических датчиков до ТП вычисляется как измеряемое пройденное расстояние конуса Маха до датчиков по системе уравнений [3]:

$$\sqrt{(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = \frac{va(t_i - t_0)}{\sqrt{v^2 - a^2}}, \quad (1)$$

где y_0, z_0 – координаты точки попадания; y_i, z_i – координаты i -го датчика D , $i=1, \dots, 4$; v – скорость пули в зоне срабатывания датчиков; a – скорость звука; t_0 – момент времени начала отсчета (т. е. время пролета через переднюю плоскость мишени); t_i – момент времени фиксации сигнала на i -м датчике D .

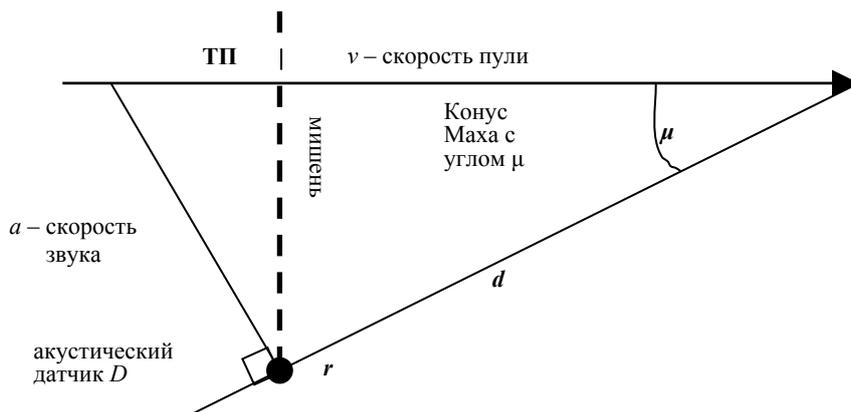


Рис. 2. Обоснование математической модели

Количество акустических датчиков мишени должно быть не меньше количества неизвестных в системе уравнений (1) и в простейшем случае равно 4 (плюс еще стартовый датчик D_s , который лишь запускает аппаратуру фиксации времени), а неизвестными считаются y_0, z_0, t_0, ζ , где $\zeta = \frac{va}{\sqrt{v^2 - a^2}}$.

При этом скорость объекта v в зоне мишени можно определить из ζ , т. к. скорость звука определяется по формуле [4]: $a = \sqrt{\frac{kgp}{\Pi}}$, где $g = 9,8065$ м/с² – ускорение силы тяжести; $k = 1,4$ – показатель адиабаты; p – атмосферное давление, кг/м²; Π – плотность воздуха, кг/м³.

Попытки решения системы уравнений простой модели (1) с определением неизвестной траектории, скорости объекта и скорости звука обнаружили вырождаемость уравнений в случае расположения всех датчиков симметрично в одной плоскости с мишенью: оси симметрии любой пары датчиков являются особыми прямыми, на которых уравнения этой пары датчиков являются следствием друг друга. А пересечение этих особых прямых в особых точках (на рис. 1 все особые прямые пересекаются в центре мишени) приводит к побочным решениям и низкой помехоустойчивости в случае попадания в окрестность них ТП (правда, благодаря неточности фиксации датчиков на раме и ориентации их чувствительных областей низкая помехоустойчивость проявлялась не так сильно, как следует из анализа) [5–8].

Геометрическое обоснование уравнений математической модели сверхзвуковой акустической мишени представлено на рис. 2, где r – расстояние от ТП до акустического датчика, а t – время дохода акустической волны до датчика от момента прохода пули через ТП. Формулы приведены ниже:

$$d = \sqrt{v^2 - a^2}; \quad \operatorname{tg}(\mu) = \frac{a}{d} = \frac{r}{v \cdot t}; \quad r = v \cdot t \cdot \operatorname{tg}(\mu);$$

$$r = \frac{v \cdot t \cdot a}{\sqrt{v^2 - a^2}}.$$

Проблемы пытались решить включением в математическую модель пятого (стартового) датчика, который вынесен перед мишенью на 4–6 м. Эта модель повысила точность фиксации ТП (проблемы вырождения системы уравнений нивелировались) и может использоваться при испытаниях со станка, т. к. из-за проблем параллакса такая схема чувствительна к позиции стрельбы [9]. Рассматривался вариант с расположением всех датчиков вдоль одной стороны (например, сверху), в этом случае особые прямые не пересекаются, но на погрешности начинают влиять факторы измерительной базы и низкий уровень сигналов на крайних датчиках.

Для кардинального решения всех проблем было увеличено количество датчиков до шести (по три с двух противоположных сторон, и такая избыточность исключала вырождаемость системы уравнений) и изменено их расположение на мишени на несимметричное, чтобы особые линии пар датчиков не совпадали и по возможности особые линии не пересекались в активной зоне регистрации (центральной области плоскости мишени). Первоначальный пример такого расположения представлен на рис. 3, когда датчики размещаются в одной плоскости в углах четырехугольника, похожего на параллелограмм и на серединах его наклонных сторон (это сделано для жесткости монолитной рамы). Благодаря этому вертикальные особые прямые 1-6, 2-5 и 3-4 не пересекаются и не пересекаются особые прямые 1-2, 1-3, 2-3 и прямые 5-6, 4-6 и 4-5. Таким образом, несимметричное расположение датчиков гарантирует, что в особых точках, попавших в активную зону регист-

рации, пересекается только две особые прямые (т. е. могут вырождаться показания двух датчиков), и поэтому количество датчиков (а значит, и уравнений (1)) должно быть всего на два больше количества неизвестных.

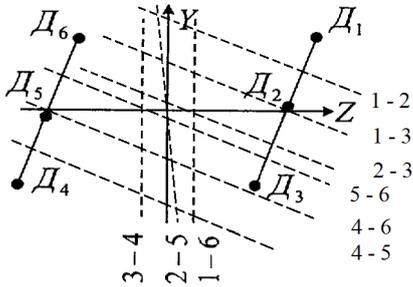


Рис. 3. Несимметричное расположение датчиков

Анализ простой математической модели (1) выявил следующие основные факторы, влияющие на точность определения ТП:

1) погрешности определения времени прихода сигнала с датчика;

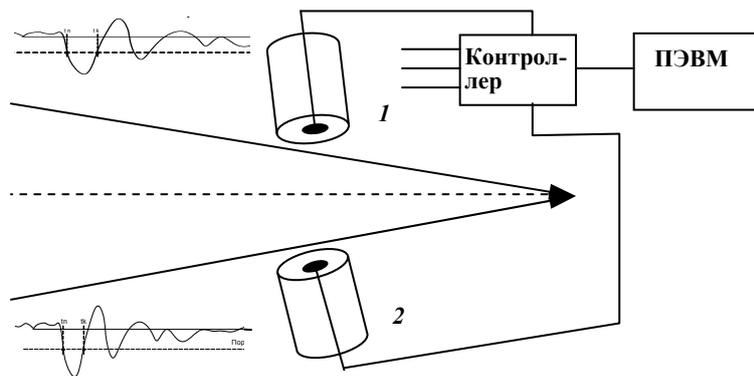


Рис. 4. Сигналы с акустических датчиков: 1 – произвольно ориентированного и 2 – перпендикулярно ориентированного

Для повышения точности задания (предварительного измерения) координат датчиков, а физически их измерить точнее чем $\pm 3\%$ практически невозможно, пришлось использовать экспериментальную идентификацию математической модели и введения в нее корректирующих регрессионных уравнений (так называемая вторичная регрессионная математическая

2) погрешности задания координат акустических датчиков.

Жесткая конструкция и единая рама для установки акустических датчиков должны обеспечить высокую точность задания их положения в пространстве (в системе координат тира). Ориентация датчиков на центр мишени и их поворот в сторону позиции стрельбы на угол конуса Маха μ обеспечивает набегание баллистической волны на чувствительную площадку пьезокерамики акустического датчика под углом, близким к нулевому. В результате длительность электрического сигнала (крутизна его переднего фронта) с выхода датчика минимальна (рис. 4). Соответственно, минимальна погрешность измерения момента времени встречи баллистической волны с датчиком. Таким конструктивным решением, а также использованием взвешенных моментов времени, когда время сигнала фиксируется, как примерно треть между передним и задним фронтами сигнала, удается повысить точность фиксации времени сигнала и снизить погрешность математической модели [10–12].

модель (2), позволяющая скорректировать результаты вычислений координат по первичной модели (1) и заодно выбрать все остальные погрешности). Попытка же провести идентификацию физической модели погрешностей определения координат показала высокую сложность и невозможность учесть все факторы [13].

$$\left. \begin{aligned} \Delta y &= a_0 + a_1 y_0 + a_2 z_0 + a_3 y_0 z_0 + a_4 y_0^2 + a_5 z_0^2 \\ \Delta z &= b_0 + b_1 y_0 + b_2 z_0 + b_3 y_0 z_0 + b_4 y_0^2 + b_5 z_0^2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \bar{y}_0 &= y_0 + \Delta y \\ \bar{z}_0 &= z_0 + \Delta z \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты регрессии вторичной модели $a_0...a_5$ и $b_0...b_5$, а эксперименты показали, что достаточно полного полинома второго порядка (2) [14], определяют по результатам опытных выстрелов (по 9 стандартным точкам несколько раз, всего выстрелов должно быть не менее 6, т. е. как количество коэффициентов), для которых наряду с временами срабатывания датчиков измеряют координаты попадания в бумажную мишень, устанавливаемую в плоскости регистрации на время идентификации модели.

Затем по методу наименьших квадратов (МНК) по уравнениям (1) определяют расчетные значения координат y_0 и z_0 , а также разности между расчетными и определенными по миллиметровой бумаге опытными значениями координат ТП Δy и Δz . По МНК определяют коэффициенты вторичной регрессионной модели поправок (2) к расчетным значениям. При этом вычисляют для контроля суммы квадратов невязок и невязки для каждого выстрела. Выстрелы с большими невязками бракуют и либо производят дострел, либо бракованные точки просто

исключают из расчетов, что повышает робастность процедуры [15, 16].

Таким образом модифицированная математическая модель сверхзвуковой акустической мишени из 6 датчиков (3) для испытаний (определения ТП \bar{y}_0, \bar{z}_0) в закрытом помещении и на расстоянии до 100 м стала включать систему уравнений по количеству датчиков и систему регрессионных уравнений по количеству координат ТП (напоминаем, в плоскости мишени $x_0=0$).

$$\begin{cases} \sqrt{(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = \frac{va(t_i - t_0)}{\sqrt{v^2 - a^2}} \\ \dots \\ \Delta y = a_0 + a_1 y_0 + a_2 z_0 + a_3 y_0 z_0 + a_4 y_0^2 + a_5 z_0^2 \\ \Delta z = b_0 + b_1 y_0 + b_2 z_0 + b_3 y_0 z_0 + b_4 y_0^2 + b_5 z_0^2 \\ \bar{y}_0 = y_0 + \Delta y \\ \bar{z}_0 = z_0 + \Delta z \end{cases} \quad (3)$$

Впоследствии возникла необходимость разработки сверхзвуковой акустической мишени на открытом воздухе и на расстоянии до 300 м с возможностью измерения скорости. Основными факторами, влияющими на точность определения ТП таких мишеней, стали ветер и замедление объекта (на расстоянии более 300 м скорость может упасть до звуковой и исказить конус Маха). Исследования показали, что до дистанции 300 м замедлением можно практически пренебречь и коррекция возможных погрешностей от него возлагается на вторичную регрессионную модель [17].

Для учета ветра \vec{U} , который приводит к смещению в сторону конуса Маха, обратимся к рис. 6, где одновременно с ветром учитывается и угол входа, т. е. траектория объекта в объеме мишени рассматривается хоть и прямолинейной, но не перпендикулярной передней плоскости мишени. Смещенный конус Маха пересекается с мишенью в виде эллипса со сдвинутым центром, который перемещается со скоростью $U_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{t_i - t_0}$ под углом входа φ .

Вектор скорости ветра в горизонтальной плоскости \vec{U} разложим в базисе X_T, Y, Z (X_T - вдоль траектории объекта \vec{V}) на составляющие U_{XT}, U_y, U_z . Составляющая ветра U_{XT} вдоль траектории приводит к изменению угла конуса Маха, так как $\text{tg}\mu = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}}$, где $M = \frac{V - U_{XT}}{a}$. Составляющие U_y и U_z приводят к параллельному переносу центра возмущения и соответственно всего эллипса вдоль осей координат Y, Z на расстояния, пропорциональные времени $\tau = t_i - t_0$, т. е. на $U_y \tau$ и $U_z \tau$.

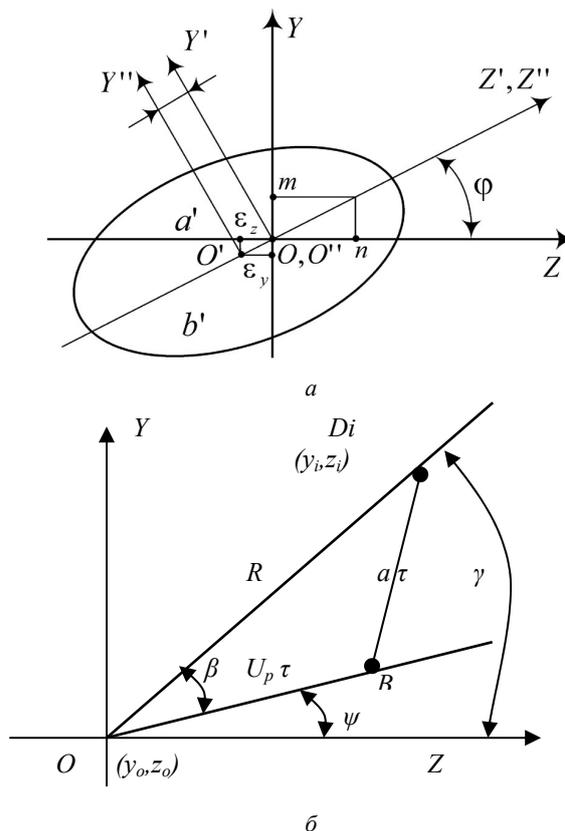


Рис. 5. Вектора в плоскости мишени: а – пересечение с конусом Маха; б – движение центра эллипса до точки B, а звуковой волны до D_i

Суммируя векторы \vec{U}_ε и \vec{U} , получим результирующий вектор $\vec{U}_p = \vec{U} + \vec{U}_\varepsilon$, направленный под углом ψ . В результате в плоскости мишени в момент времени τ , соответствующий пересечению звуковой волной датчика $D_i (y_i, z_i)$, получается картина, изображенная на рис. 5, б, где центр O системы координат YZ совмещен с ТП (y_0, z_0) ; a – скорость распространения звуковой волны в неподвижной атмосфере в сечении YZ ; U_p – скорость перемещения центра источника возмущения из-за наклона траектории и ветра. Евклидово расстояние между ТП и датчиком D_i равно $R = \sqrt{(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$.

Из $\triangle OBD_i$ имеем $(a\tau)^2 = R^2 + (U_p \tau)^2 - 2RU_p \tau \cos\beta$, откуда получим модель мишени с учетом ветра и наклона траектории

$$F = (a^2 - U_p^2)(t_i - t_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2 + 2U_p (t_i - t_0) \sqrt{(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \cos\beta = 0, \quad (4)$$

где $\beta = \gamma - \psi = \arctg \left| \frac{y_i - y_0}{z_i - z_0} \right| - \psi$ для первого октанта.

Таким образом, в модели (4) в случае известных координат датчиков (y_i, z_i) и измеренных моментов времени t_i пересечения фронтом звуковой волны датчиков содержится 6 неизвестных a , U_p , β , t_0 , y_0 и z_0 . Замена эллипса конуса Маха в плоскости мишени окружностью (обоснованное упрощение модели рис. 5, а) [18]) позволила сократить число переменных до шести. К результатам расчетов применяется вторичная регрессионная модель (2) по описанной выше технологии идентификации модели.

Для исключения вырождения системы на особых прямых и повышения обусловленности системы необходимо увеличить число датчиков до восьми и расположить их несимметрично по четыре слева и справа [19]. При необходимости определения скорости объекта ставятся две мишени (D_i и D_i') на расстоянии L' 2–3 м, но уже по 6 датчиков, т. к.

неизвестные a_k , U_p , ψ являются общими, и получается 9 неизвестных на 12 датчиков, а скорость вычисляется по $V = \frac{L'}{t'_0 - t_0}$.

Совершенствование вычислительных средств позволило снять ограничения простой математической модели (1) на игнорирование баллистики объекта при пролете в объеме мишени, особенно угла курса и угла точки входа (падения). Мишень обычно настраивается для работы с конкретной рабочей позиции, а если требуется выполнять стрельбу с другого места, то меняются настройки в программном обеспечении, что усложняет эксплуатацию (рис. 6). Поэтому создание инвариантной к направлению стрельбы математической модели упростит обслуживание мишени и даст возможность вести стрельбу с любой точки тира, а значит, повысит точность фиксации ТП.

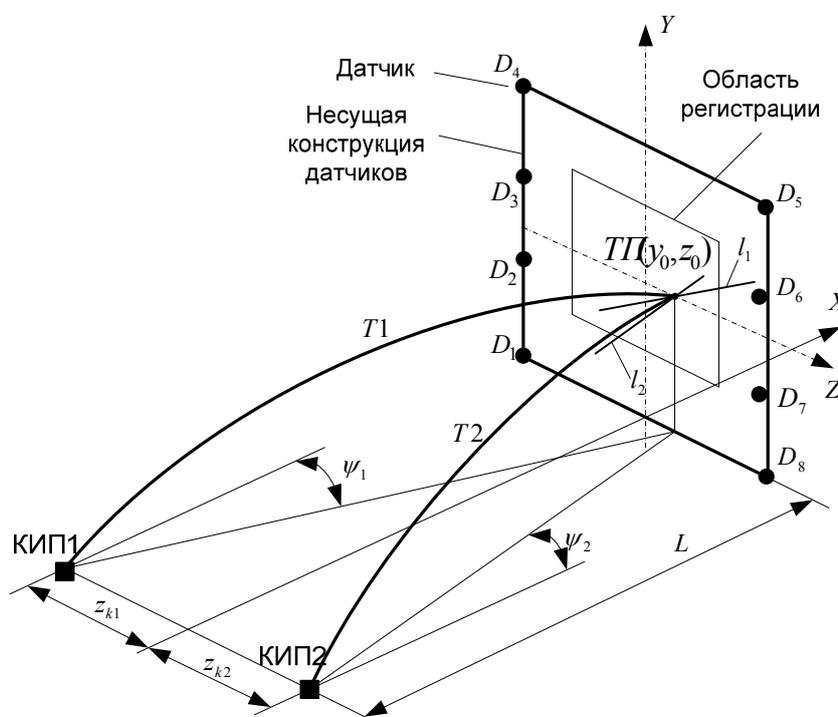


Рис. 6. Контрольно-испытательные посты (КИП) и акустическая мишень:
 l_1, l_2 – линии, аппроксимирующие траектории объектов $T1$ и $T2$

Таким образом, математическая модель мишени, инвариантной к направлению стрельбы, должна обеспечивать определение не только координат ТП, но и угла направления (курса) стрельбы. При этом считается, что траектория пули в зоне регистрации представляет собой все же прямую линию, но касательную к истинной траектории пули и проходящую через ТП под углом наклона θ_1 и уг-

лом курса ψ , значения которых и подлежат определению (рис. 6, 7). В ранних же моделях (3) мишени траектория представлялась прямой, проходящей через ТП и параллельно оси X , такое упрощение вносило существенные погрешности в работу мишени при отклонениях рабочей позиции при испытаниях.

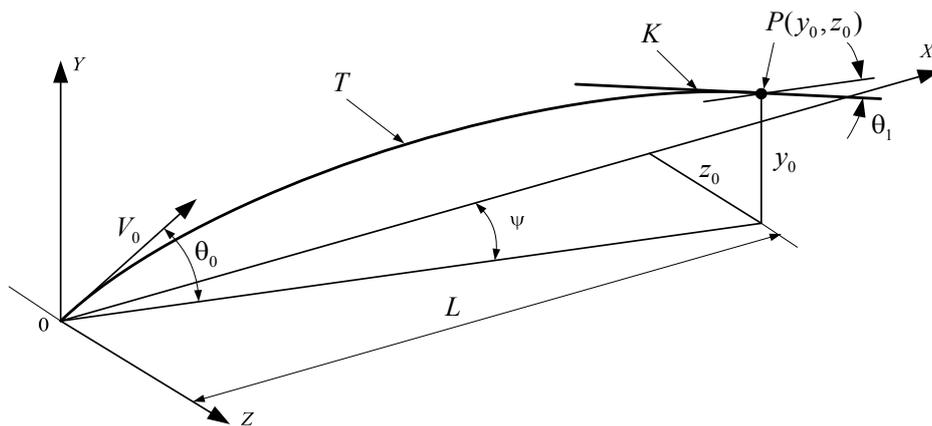


Рис. 7. Траектория пули, проходящая через точку $P(y_0, z_0)$: V_0 – начальная скорость; T – траектория; ψ – угол курса; θ_0 – угол бросания; K – касательная к траектории в ТП; θ_1 – угол падения; L – дальность

Инвариантность в математическую модель вносятся преобразованием координат для совмещения оси OX^* с касательной к траектории пули в ТП (рис. 8) и с учетом постоянства скорости пули после ТП [20, 21]. Получаем для каждого датчика:

$$t_i = \frac{\sqrt{(y_i^*)^2 + (z_i^*)^2} + x_i^*}{v} - t_0, \begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \\ 1 \end{bmatrix} = McdMyMz \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты i -го датчика; t_i – время срабатывания i -го датчика; v – скорость пули в зоне срабатывания датчиков; t_0 – начало отсчета времени; $\text{tg}u$ – тангенс угла Маха. Матрицы преобразования координат имеют вид

$$Mcd = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, My = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Mz = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где Mcd – матрица сдвига; $-x_0, -y_0, -z_0$ – величины сдвигов соответственно в направлении осей X, Y и Z начала координат в ТП (чаще всего, $x_0 = 0$); My, Mz – матрицы поворотов соответственно вокруг осей Y и Z ; ψ – угол поворота (курса) системы вокруг оси Y ; θ_1 – угол поворота (падения) вокруг оси Z .

Неизвестными в этой системе уравнений (5) с учетом (6) являются $z_0, y_0, v, \psi, \theta_1, t_0$, что и требует не менее 6 акустических датчиков на мишени, а для повышения обусловленности системы, как выяснено

выше, 8 датчиков (рис. 7). 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.

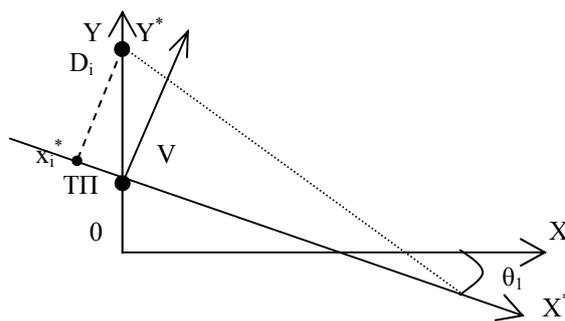


Рис. 8. Преобразование координат

Если координаты точки вылета пули известны (например, позиция стрелка или расположение станка в тире), то угол курса определяется как $\psi = \arctan \frac{(z_0 - z_c)}{L}$, где z_0 – боковая координата ТП; z_c – боковая координата точки вылета; L – расстояние между точкой вылета и плоскостью регистрации.

После определения вышеуказанных неизвестных в случае заданного L можно найти еще и начальную скорость V_0 , угол бросания θ_0 (рис. 7) и баллистический коэффициент c в результате решения обратной задачи баллистики для системы обыкновенных дифференциальных уравнений [22]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -cG(V); & \frac{d\gamma}{dx} &= -\frac{g}{u^2}; & \frac{dy}{dx} &= \gamma = \text{tg}\theta; & \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{u}; \\ V &= u\sqrt{1 + \gamma^2}, \end{aligned} \right\}$$

где $u = V \cos \theta$ – проекция скорости на ось X ; $\gamma = \operatorname{tg} \theta$ – 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 свободно падающего тела.

Таким образом, при исследовании эволюции математических моделей сверхзвуковых электронных акустических мишеней выявлены следующие факторы, влияющие на повышение погрешностей измерения ТП и скорости:

1) количество датчиков математической модели и ее обусловленность;

2) координаты датчиков в пространстве мишени;

3) сигнал с акустического датчика и выделение времени отсечки;

4) модель баллистической кривой в пространстве мишени;

5) внешние условия проведения испытаний (ветер, дистанция и т. п.)

и предложены методы по повышению точности определения измеряемых параметров:

1) увеличение количества датчиков и несимметричное их размещение для минимизации их линейной зависимости;

2) координаты датчиков уточняются во время идентификации регрессионных уравнений вторичной модели;

3) время отсечки по сигналам с датчиков определяется по взвешенным моментам времени;

4) баллистическая кривая в пространстве мишени считается прямолинейной (касательной к баллистической кривой), но не перпендикулярной плоскости мишени, а с углами курса и входа, что вводит аффинные преобразования координат в математическую модель;

5) существенного усложнения математической модели для учета ламинарного умеренного ветра удалось избежать обоснованным упрощением и незначительным увеличением количества датчиков.

Анализ показал актуальность дальнейшего исследования и использования электронных акустических сверхзвуковых мишеней, особенно благодаря дешевизне датчиков и рамной конструкции, простотой пусконаладочных работ и достаточно высокой точности в закрытых помещениях и приемлемыми значениями на открытом воздухе.

Библиографические ссылки

1. Эволюция электронных акустических мишеней: информационно-измерительные системы для стрелкового оружия / С. Ф. Егоров, В. С. Казаков, В. А. Афанасьев, И. Г. Корнилов, И. В. Коробейникова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4 (31). – С. 104–110.

2. Егоров С. Ф., Коробейников В. В., Казаков В. С. Информационно-измерительные системы оборонного назначения: стрелковые тренажеры и электронные мишени // Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем

и новых материалов : материалы научных исследований. – Ижевск, 2015 – С. 328–349.

3. 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.

4. Ермолаев С. И., Комаров Л. Б., Чурбанов Е. В. Внешняя баллистика. – Л. : Типогр. ВМАКВ им. А. Н. Крылова, 1958. – 715 с.

5. Коробейникова И. В., Коробейников В. В., Казаков В. С. Оценивание результатов испытаний в ИИС на основе автоматических мишеней // Вестник Ижевского государственного технического университета. – № 4 (31). – 2006. – С. 43–49.

6. Афанасьев В. А., Афанасьева Н. Ю., Талашева В. С. Анализ подходов к назначению точности измерений при оценке качества продукции // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2006. – № 3 (30). – С. 52–57.

7. Афанасьев В. А., Коробейникова И. В., Коробейников В. В. Контроль изделий по кучности стрельбы методом последовательного анализа // Вестник КИГИТ. – 2010. – № 1 (10). – С. 46–54.

8. Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В. Анализ погрешностей управления техпроцессом приведения изделий к нормальному бою // Вестник КИГИТ. – 2010. – № 1 (10). – С. 82–85.

9. Коробейников В. В., Казаков В. С. Акустическая мишень с выносным датчиком // Интеллектуальные системы в производстве. – № 1 (21). – 2013 – С. 127–129.

10. Казаков В. С., Казаков С. В. Построение измерительных систем для стрелкового оружия на современной технической базе // Интеллектуальные системы в производстве. – № 2 (16). – 2010 – С. 134–138.

11. Афанасьев В. А. Демпфирование акустических датчиков в системах испытаний для определения внешнебаллистических параметров // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (45). – С. 137–139.

12. Егоров С. Ф., Коробейников В. В. Повышение точности акустической мишени за счет использования взвешенных моментов времени // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 105–108.

13. Коробейников В. В. Информационно-измерительные системы на основе акустических мишеней : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 1999.

14. Там же.

15. Коробейников В. В., Коробейникова И. В. Варианты моделей акустических мишеней // Вестник КИГИТ. – 2012. – № 1 (19). – С. 18–23.

16. Афанасьев В. А., Коробейникова И. В. Модели акустических мишеней для сверхзвуковых и дозвуковых скоростей движения пуль // Системная инженерия. – 2015. – № 1 (1). – С. 53–64.

17. Казаков С. В. Разработка и исследование информационно-измерительной системы на основе акустических мишеней для испытаний стрелкового оружия на открытой местности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2002.

18. Пат. 2331738 Российская Федерация, МПК F41 J 5/06. Способ определения внешнебаллистических характеристик полета пуль и снарядов / Веркиенко Ю. В., Казаков В. С., Казаков С. В., Коробейников В. В.; заявитель

и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. – № 2002119931/02; заявл. 22.07.2002; опубл. 27.06.2004. Бюл. № 7-ил.

19. Афанасьев В. А., Казаков С. В. Модели акустической волны при различных скоростях движения пули и звука с учетом ветра // Системная инженерия. – 2015. – №1 (1). – С. 41–52.

20. Коробейников В. В., Коробейникова И. В. Математическая модель универсальной сверхзвуковой акустической мишени // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 3 (55). – С. 101–103.

21. Егоров С. Ф., Коробейникова И. В., Коробейников А. В. Исследование влияния на точность акустической мишени, инвариантной к рабочей позиции математической модели // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015 – № 3 (27). – С. 45–49.

22. Решение обратной задачи внешней баллистики в информационно-измерительной системе / В. А. Афанасьев, Н. Ю. Афанасьева, А. Ю. Вдовин, Ю. В. Веркиенко // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2008. – № 4 (39). – С. 104–106.

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Institute of Mechanics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

V. S. Kazakov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

V. A. Afanasyev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

I. G. Kornilov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

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

Evolution of Electronic Acoustic Targets: Research of Supersonic Mathematical Models

The paper considers the history of improvement of mathematical models of supersonic acoustic targets for small arms at the Computer facilities department of ISTU of M. T. Kalashnikov and at Institute of mechanics of the Ural Branch of RAS in 25 years. Electronic acoustic targets are widely used for test and diagnostics of small and artillery arms on productions and military acceptance and increase in their accuracy. Models of targets with various placement of acoustic sensors are investigated, targets firing practice, invariant to a position, and the targets working in the open air at a windy situation are analysed with reasonable simplifications of physical processes in each model. The major factors influencing the accuracy of definition of a point of hit are shown. Mathematical and design methods on decrease in errors of work of an acoustic target are given, such as: the asymmetrical arrangement of acoustic sensors in a frame design for non-degeneration of system of the equations, the use of the weighed timepoints when processing signals from sensors for invariancy of orientation of sensors, the accounting of moderate laminar wind at tests by reasonable complication of mathematical model and increase in number of sensors, the accounting of an angle of a course and hade of a trajectory of an object in target space for definition of the departure point by transformation of coordinates in mathematical model, and the use of secondary regression mathematical model for reduction of unaccounted errors in the open air. The conclusion is drawn on prospects of further researches and improvements of mathematical models of supersonic electronic acoustic targets to increase their accuracy and decrease their prime cost.

Keywords: acoustic target, acoustic transducer, error, system of equations, measuring system, mathematical model.

Получено: 12.05.17