

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 623.593; 681.31; 004.021
DOI 10.22213/2410-9304-2018-3-42-51

ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗВУКОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент,
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН;
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Приведена история совершенствования за 25 лет на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН математических моделей дозвуковых акустических электронных мишеней, широко используемых на производствах для испытания и диагностики стрелкового оружия с целью повышения их точности. Показаны модели мишеней с пространственным размещением акустических датчиков, модели с определением не только точки попадания, но и скорости объекта, в каждой модели проанализированы обоснованные упрощения физических процессов. Исследована физическая модель, учитывающая распространение возмущения от точки попадания не только по воздуху, но и по формователю-резине. 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 в пространстве мишени на разных расстояниях для невырождения системы уравнений и возможности использовать стандартный четырехканальный цифровой осциллограф для связи, использование взвешенных моментов времени при обработке сигналов с датчиков для инвариантности ориентации датчиков к точке попадания, использование демпфирующих прокладок для гашения вибрационных помех от формователя, использование вторичной регрессионной математической модели для уменьшения неучтенных погрешностей. Сделан вывод о перспективности дальнейших исследований и усовершенствований математических моделей, конструкций и элементной базы дозвуковых электронных акустических мишеней с целью повышения их точности, снижения себестоимости и, значит, повышения конкурентоспособности.

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

Введение

Электронные акустические мишени, хотя и основаны на реагировании акустических датчиков на звукобаллистическую волну (конус Маха) от пролетающего выше скорости звука объекта и косвенном расчете точки попадания (ТП) по временам прихода сигналов с датчиков [1–5], могут использоваться на производстве и для определения параметров кучности и точности дозвукового стрелкового оружия. При скорости объекта меньше 500 м/с полноценный конус Маха не образуется, и поэтому в конструкцию мишени вводится преобразующая многогоразовая резиновая плоскость (так называемый формователь возмущения) для генерации при пробивании ее полусферической звуковой волны из ТП (рис. 1, формователь расположен в плоскости YoZ , а траектория пули идет вдоль оси X), которая и воздействует на акустические датчики (D_i).

Первичная математическая модель

Первичная математическая модель дозвуковой акустической мишени, исходя из равенства

расстояния от ТП до датчика и пути движения звуковой волны от ТП до него, составляет систему уравнений по числу установленных датчиков [6]:

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = a(t_i - t_0), \quad (1)$$

где t_i – время прихода звуковой волны до i -го датчика; t_0 – время начала отсчета (пролет через формователь); (x_i, y_i, z_i) – координаты i -го датчика; (x_0, y_0, z_0) – координаты точки попадания; a – скорость звука в воздухе.

Формователь возмущения расположен в плоскости регистрации мишени, центр которой, как правило, совпадает с началом координат, т. е. $x_0 = 0$, координаты расположения датчиков D_i известны, скорость распространения звука тоже условно известна. Неизвестными в этой системе являются: y_0, z_0 – координаты ТП; t_0 – время начала движения звуковой волны от ТП. Для их определения теоретически достаточно иметь в конструкции только три датчика.

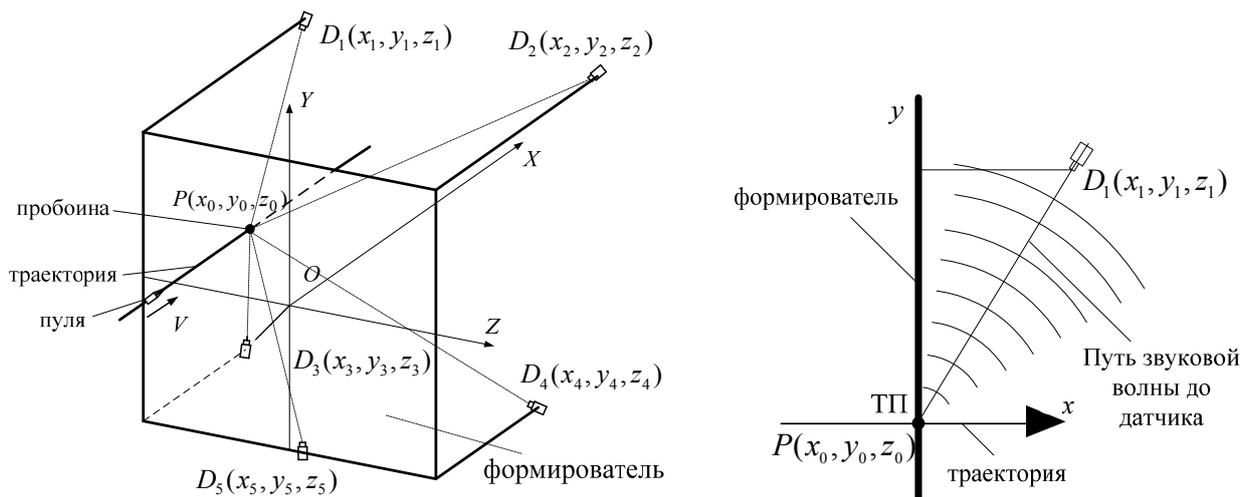


Рис. 1. Схема распространения звуковой волны в пространстве дозвуковой мишени с пятью акустическими датчиками

Дозвуковая мишень используется чаще всего в закрытых помещениях, и скорость звука можно определить по формуле, используя атмосферные датчики:

$$a = \sqrt{\frac{kgp}{\Pi}},$$

где $g = 9,8065 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; $k = 1,4$ – показатель адиабаты; p – атмосферное давление, кг/м^2 ; Π – плотность воздуха, кг/м^3 . Чтобы не усложнять конструкцию мишени устройствами преобразования и ввода данных о метеоусловиях для вычисления скорости звука a , можно и ее считать величиной неизвестной и определять вместе с другими неизвестными (1), а для этого добавить в конструкцию еще один, четвертый, акустический датчик.

При решении системы уравнений первичной модели (1) обнаружилась их вырождаемость [7, 8] при попадании на испытаниях в «особые» прямые, которые образуются на плоскости формирователя при пересечении с плоскостями симметрии каждой из пары датчиков. На «особых» прямых уравнения пары датчиков являются следствием друг друга, что приводит к низкой помехоустойчивости и наличию побочных решений системы уравнений, особенно в местах пересечения «особых» прямых – «особых» точках. Для решения этой проблемы вводится пятый акустический датчик в конструкцию мишени и проводится оптимизация расположения датчиков для выведения «особых» точек за пределы зоны регистрации (рис. 2). Пятый датчик расположен снизу и всех ближе к зоне регистрации, первый и второй (верхние, рис. 1) – всех

дальше, за счет такого пространственного разнесения датчиков удается все «особые» точки увести вверх и в стороны от зоны регистрации.

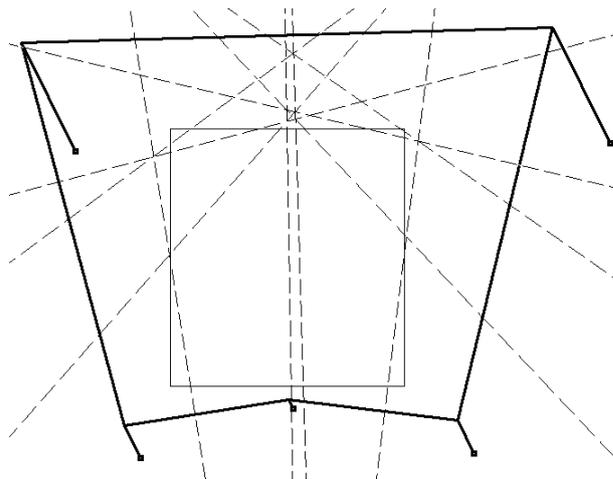


Рис. 2. Пример оптимального расположения пяти датчиков в пространстве мишени и разнесения «особых» точек за пределы зоны регистрации

Вторичная математическая модель

Хотя предполагается, что координаты расположения датчиков известны точно, на практике они определяются с погрешностями, поэтому в дополнение к первичной математической модели применяется вторичная, регрессионная модель для вычисления поправок. В качестве нее используется полный полином второй степени [9]:

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

где y_0, z_0 – вычисленные координаты по первичной модели; $\Delta y, \Delta z$ – поправки к вычисленным координатам; a_j, b_j – коэффициенты; $j = 0, \dots, 5$ – порядковый номер коэффициента.

Коэффициенты a_j, b_j в (2) определяются на этапе настройки мишени в результате вычисления при опытных стрельбах координат ТП по первичной модели (1) и сравнения их с измеренными вручную по бумажной мишени. По методу наименьших квадратов определяют коэффициенты вторичной модели поправок к расчетным значениям. При этом вычисляют для контроля суммы квадратов невязок (рассогласований координат) и невязки для каждого выстрела. Выстрелы с большими невязками бракуют и либо производят дострел, либо бракованные точки просто исключают и повторяют определение коэффициентов вторичных моделей [10].

В каждом уравнении (2) содержится 6 неизвестных коэффициентов, и поэтому необходимо произвести минимум 6 выстрелов, но лучше 9: по углам зоны регистрации, центру мишени и центрам сторон.

Таким образом, полная математическая модель дозвуковой акустической мишени на пять акустических датчиков при 4 неизвестных y_0, z_0, t_0, a для вычисления откорректированных координат ТП \bar{y}_0, \bar{z}_0 выглядит так (пять уравнений первичной модели и два вторичной):

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

Данная мишень и ее математическая модель, благодаря формирователю возмущения, инвариантна к положению стрелка, т. е. к углу входа и углу курса пули и ее скорости (т. е. в принципе является и сверхзвуковой, правда, при этом интенсивнее изнашивается резиновый преобразователь и выше вибрационные нагрузки, а значит, и помехи на акустических датчиках, в том числе от конуса Маха).

Следующим фактором, влияющим на погрешности измерения ТП, кроме математических моделей и связанных с ними ограничений на размещение датчиков на раме, является электронная часть мишени: сами акустические датчики и схемы связи их с ПЭВМ. В качестве чувствительного элемента в датчике используется пьезокристаллическая пластина, на которой под действием давления воздушной волны появляется напряжение, пропорциональное силе давления, но из-за малых значений требующее использовать усилитель сигнала.

В основе данных датчиков (рис. 3) используется пьезокерамический элемент ЦТС-19 (m_0) через три демпфирующие прокладки и две демпфирующие массы (m_1, m_2) соединенный с основанием датчика [11].

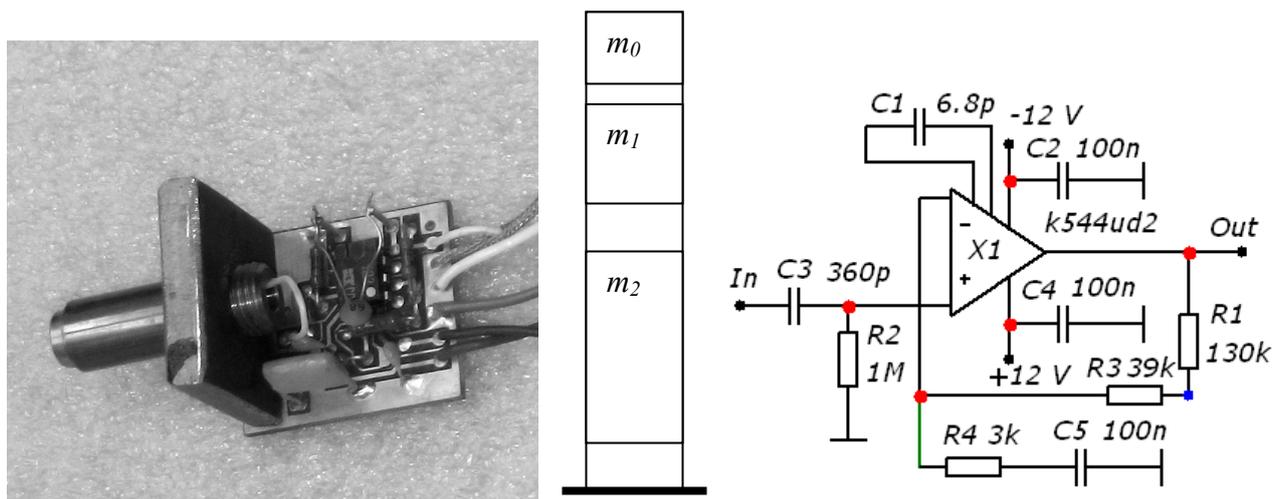


Рис. 3. Фотография акустического датчика, схема пьезокристалла и схема усилителя

Это обеспечивает нечувствительность пьезокерамики к вибровоздействиям со стороны конструкции рамы мишени, которая связана с колеблющимся от выстрела формирователем, и одновременно датчик «не проваливается» под действием давления звуковой волны, что при-

водило бы к уменьшению полезного сигнала. В качестве прокладок используется клей «Момент» и пористая резина, а демпфирующие массы на порядок превышают кристалл ($m_0 = 0,3$ мг) и друг друга ($m_1 = 3$ и $m_2 = 30$ мг).

Кроме демпфирования пьезокристалла необходимо использовать и виброизоляцию всего датчика от рамной конструкции, связанной с формирователем для фильтрации опережающей волны возмущения, которая в твердом теле превышает скорость звука в воздухе в 3–5 раз и создает помехи сигнала.

Взвешенная модель моментов времени

Сферическая звуковая волна от ТП в формирователе набегаает на чувствительную плоскость

пьезокристалла (3–5 мм) и вызывает затухающий колебательный сигнал (рис. 4), важные параметры которого (амплитуда сигнала и длительность фронтов первого пика) сильно зависят от угла соприкосновения направляющей волны и плоскости кристалла. Когда они перпендикулярны, амплитуда сигнала максимальна, а фронты первого пика минимальны, что позволяет наиболее точно определить момент времени прихода звуковой волны.

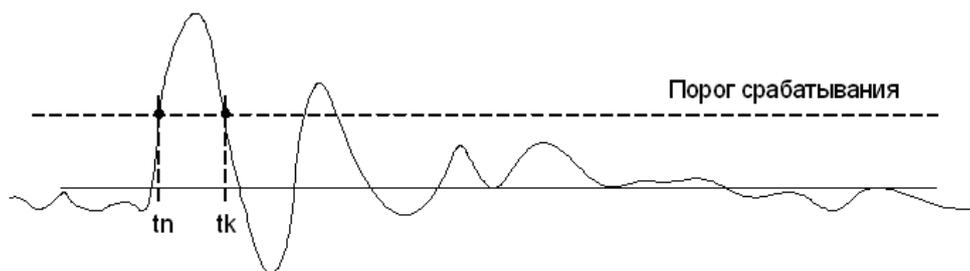


Рис. 4. Идеализированное изображение сигнала с датчика

Первоначально время определялось по середине переднего фронта первого пика сигнала (t_n), а датчики конструктивно установлены с направлением на центр зоны регистрации. Это приво-

дило к удлинению переднего фронта сигнала и принципиальной погрешности определения ТП, которая возрастала от центра к краям поля регистрации (рис. 5).

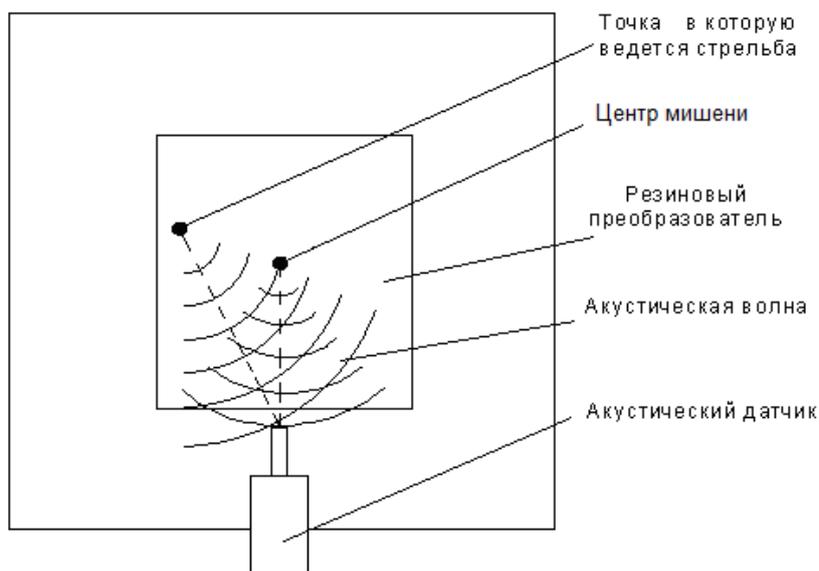


Рис. 5. Зависимость угла прихода волны от точки попадания

Невозможность в дозвуковой мишени обеспечить ориентацию чувствительной пластины каждого датчика перпендикулярно направлению звуковой волны по всему полю регистрации, т. к. угол направляющей зависит от ТП (в отличие от сверхзвуковой мишени, где датчики можно сориентировать под угол Маха, который не зависит от ТП, а зависит от скорости), решилась

использованием «взвешенного» момента времени.

Чтобы уменьшить погрешность по всей зоне регистрации необходимо привести времена срабатывания датчиков к моменту прохождения ударной волны через центр пьезокристаллической пластинки (так называемое взвешенное время) по формуле:

$$t_i = k \cdot t_k + (1 - k) \cdot t_n,$$

где t_i – взвешенное время срабатывания i -го датчика; t_n – время начала сигнала; t_k – время окончания сигнала; k – коэффициент взвешенного времени, при $k = 0$ время датчика определяется по переднему фронту на заданном уровне порога, при $k = 1$ время датчика определяется по заднему фронту на заданном уровне порога, при $0 < k < 1$ время датчика определяется как взвешенное между передним и задним фронтами, экспериментально определено $k = 0,4$ [12].

Для связи датчиков с ПЭВМ (или микроконтроллером) удобнее использовать стандартное согласующее устройство – виртуальный цифровой осциллограф (ЦО). Большинство ЦО являются дву- или четырехканальными, т. е. способны одновременно фиксировать не более четырех сигналов, а в мишени используется большее

количество акустических датчиков, поэтому пришлось размещать датчики не в одной плоскости, а уже в объеме мишени [13]. Благодаря существенной разности в расстоянии от датчиков до потенциальной ТП (рис. 1, например, датчики D_1 и D_3) их можно подключить через высокочастотные германиевые диоды к одному каналу (при этом отрицательная волна сигнала теряется). Звуковая волна при любой ТП дойдет до этих датчиков последовательно, и сигналы от них можно будет уверенно выделить из одного потока данных (рис. 6).

Использование стандартных компонент для связи при построении мишени и унифицированных датчиков позволили снизить себестоимость и повысить надежность мишени за счет ремонтпригодности. Но и становится актуальной задача фильтрации и преобразования цифровых сигналов к виду сигналов, полученных с аналоговых датчиков.

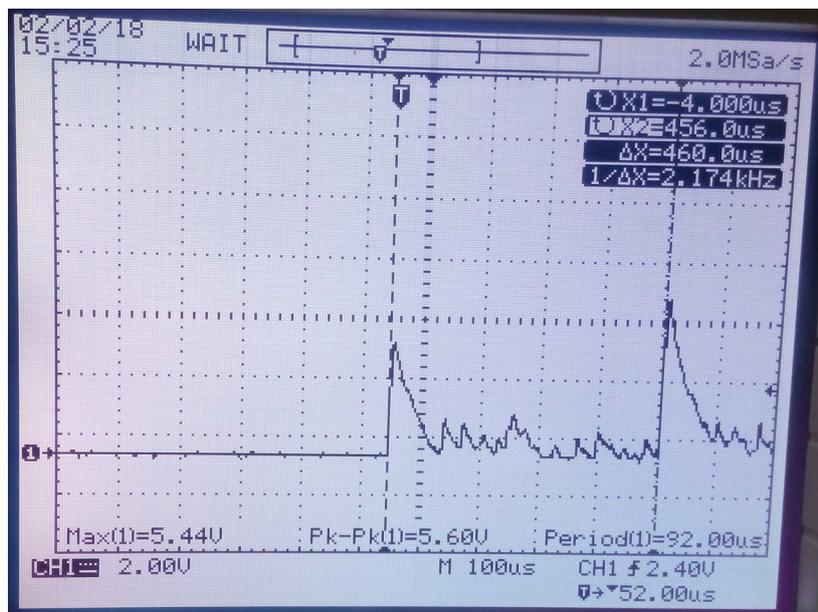


Рис. 6. Виды реальных сигналов с двух акустических датчиков на одном канале ЦО

В ряде случаев цифровые сигналы состоят из участков ограниченной длительности со скачками скорости на границах участков (рис. 6), что накладывает определенные требования на алгоритмы цифровой обработки.

Скоростная математическая модель

Кроме определения координат ТП дозвуковые мишени позволяют определять и скорость объектов на рубеже. Для этого в конструкцию мишени устанавливается второй формирователь, отстоящий от первого на определенном расстоянии L (40–70 см), и за ним ставится шестой акустический датчик D_6 (рис. 7) [14].

Математическая модель дозвуковой мишени для определения скорости V получается в предположении, что траектория движения пули в пространстве мишени является прямой линией и параллельна оси OX , т. е. координаты ТП одинаковы для обоих формирователей. Если использовать показания времен только скоростных датчиков D_5 и D_6 , координаты которых должны быть одинаковы относительно своих формирователей, то скорость объекта определяется из следующего выражения:

$$\frac{L}{V} = t_6 - t_5 \quad \text{и} \quad V = \frac{L}{t_6 - t_5}.$$

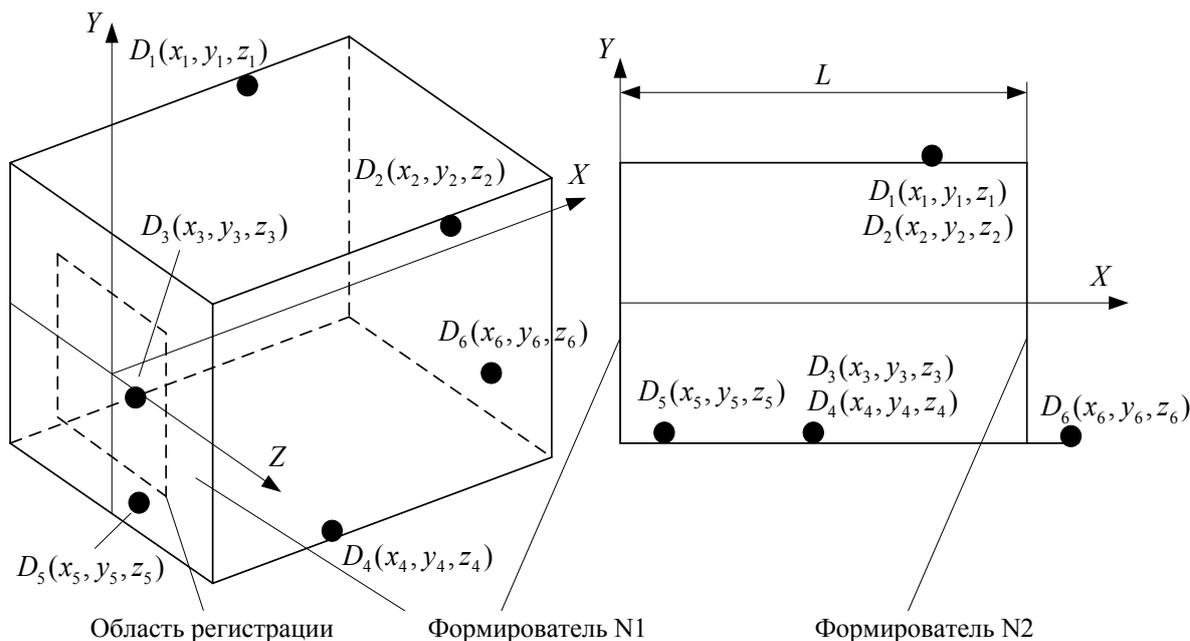


Рис. 7. Конфигурация датчиков мишени для измерения координат ТП и скорости

Если на координаты D_6 не накладывать такие жесткие требования, то скорость определяется из другого выражения:

$$\frac{L}{V} + \frac{\sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2}}{a} = t_6 - t_0,$$

где L – расстояние между формирователями; V – скорость движения пули; (x_6, y_6, z_6) – координаты скоростного датчика D_6 ; (y_0, z_0) – координаты точки попадания; a – скорость звука в воздухе; t_6 – время прихода звуковой волны до скоростного датчика D_6 ; t_5 – время прихода

звуковой волны до ближнего (скоростного) датчика D_5 ; t_0 – начало отчета времени формирования звуковой волны в первом формирователе. Координаты ТП (y_0, z_0) и значения t_0 , a определяются из решения системы (1). А V вычисляется:

$$V = \frac{aL}{a(t_6 - t_0) - \sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2}}. \tag{3}$$

Если использовать времена скоростного D_6 и какого-нибудь из координатных датчиков, то скорость определяется из выражения

$$\frac{L}{V} + \frac{\sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2} - \sqrt{x_j^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2}}{a} = t_6 - t_j,$$

где x_j, y_j, z_j – координаты j -го датчика; t_j – время прихода звуковой волны от ТП в первом формирователе до j -го датчика; $j = 1, \dots, 4$ –

номер координатного датчика. Выражаем V и получаем:

$$V = \frac{aL}{a(t_6 - t_j) - \{ \sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2} - \sqrt{x_j^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2} \}}. \tag{4}$$

Такой подход позволяет повысить точность вычисления скорости путем усреднения значений, полученных по (4) для каждого координатного датчика.

Таким образом, на точность определения скорости объекта влияют погрешности в определении координат расположения акустических датчиков и расстояния между формирователя-

ми, а также потери в скорости пули при приближении двух формирователей. Для компенсации потери скорости вводится коэффициент согласования, который равен отношению:

$$k_v = \frac{V_{sv}}{V_{ak}},$$

где V_{sv} – средняя скорость по серии выстрелов, определенная с помощью эталонной мишени, не создающей механических помех для движения пули, например световой мишени, на дистанции, привязанной к середине акустической мишени (т. е. блокирующие экраны световой мишени расположены на дистанции формирователей акустической мишени); V_{ak} – средняя скорость по серии выстрелов, выполненных теми же пулями и из того же стрелкового оружия, определенная с помощью дозвуковой акустической мишени на той же дистанции.

В рабочем режиме работы акустической мишени скорость пули вычисляется по формуле

$$V^* = k_s V,$$

где V^* – скорректированное значение скорости движения пули; k_s – коэффициент согласования; V – значение скорости, вычисленное по (3) или по (4).

Данная математическая модель уже не инвариантна к траектории стрельбы, т. е. рабочее место должно находиться строго напротив мишени, а траектория на рубеже быть горизонтальной, и малейшие отклонения вносят погрешности в определение скорости (но не ТП).

Комбинированная математическая модель

Следующая математическая модель (так называемая комбинированная) учитывает уже тот факт, что возмущение в резиновом формирователе после пробития его пулей распространяется не только звуковой волной по воздуху, но и волной по резине формирователя и быстрее скорости звука в воздухе, постоянно вызывая микроволны в воздухе [15]. Получается, что путь волны до датчика складывается из $R - h$ по резине и $\sqrt{x^2 + h^2}$ по воздуху (рис. 8).

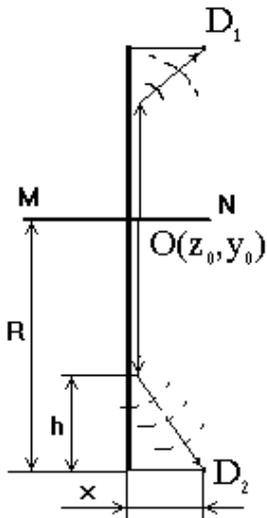


Рис. 8. Схема распространения звуковой волны комбинированным способом (резина+воздух)

Обозначим a_1 – скорость распространения звука в резине, тогда для каждого датчика справедливо уравнение

$$\frac{R-h}{a_1} + \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{a} = \bar{t}_i - t_0, \tag{5}$$

где \bar{t}_i – время срабатывания i -го датчика.

Из физики процесса распространения следует, что значение h определяется минимальным временем прохождения комбинированной волны от источника до датчика.

Заменим $t_i = \bar{t}_i - t_0$:

$$t_i = \bar{t}_i - t_0 = \frac{R-h}{a_1} + \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{a}$$

и продифференцируем по h :

$$\frac{dt_i}{dh} = -\frac{1}{a_1} + \frac{h}{a\sqrt{x^2 + h^2}}.$$

Значение h определяется из решения уравнения $\frac{h}{a\sqrt{x^2 + h^2}} - \frac{1}{a_1} = 0$:

$$h = \frac{ax}{\sqrt{a_1^2 - a^2}}.$$

Подставляем h в (5) и получим для каждого i -го датчика:

$$\bar{t}_i - t_0 = \frac{\sqrt{(z_i - z_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - \frac{a(x_i - x_0)}{\sqrt{a_1^2 - a^2}}}{a_1} + \frac{(x_i - x_0)\sqrt{\frac{a^2}{a_1^2 - a^2} + 1}}{a}. \tag{6}$$

Моделирование дозвуковой акустической мишени показало, что комбинированная модель (6) ближе всего к ее физической модели. Близость математической и физической моделей оценивалась по разнице времен срабатывания датчиков по совокупности выстрелов, полученных при моделировании и в реальных условиях при стрельбе. По реальным координатам генерировались времена в соответствии с используемой математической моделью и затем сравнивались с реальными значениями, погрешность определения координат не превысила 0,5–1 мм [16, 17].

Выводы

Таким образом, при исследовании эволюции математических моделей дозвуковых электронных акустических мишеней выявлены следующие факторы, влияющие на увеличение погрешностей измерения точки попадания и скорости объекта:

1) количество датчиков математической модели и ее обусловленность с учетом количества неизвестных математической модели;

2) точность задания координат датчиков в пространстве мишени;

3) наличие формирователя возбуждения (резиновой плоскости), вносящего вибрационные помехи;

4) направленность чувствительной области акустических датчиков только на центр зоны регистрации в ущерб краям;

5) множество акустических датчиков требуют многоканальных быстродействующих регистрирующих с них сигналы устройств;

6) влияние формирователя возмущения на замедление скорости объекта;

7) распространение колебаний комбинированным способом и по воздуху, и по формирователю и их влияние на сигналы датчиков;

8) организационные условия проведения испытаний (износ формирователя возмущений – резины, колебания конструкции).

И предложены методы по повышению точности определения измеряемых параметров:

1) увеличение количества датчиков на один по сравнению с неизвестными математической модели и несимметричное размещение в пространстве мишени для минимизации их линейной зависимости;

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

3) в конструкцию акустического датчика вводятся демпфирующие массы и прокладки для снижения вибрационных помех;

4) время сигнала с датчика определяется по «взвешенным» моментам времени между передним и задним фронтом первого пика;

5) благодаря пространственному разнесению акустических датчиков возможно использовать стандартный четырехканальный цифровой осциллограф для фиксации сигналов с объединением на одном канале пары из ближнего и дальнего датчиков (т. е. до 8 датчиков);

6) при определении скорости объекта вводится экспериментальный коэффициент согласования, и расчет скорости ведется по всем координатным датчикам с усреднением;

7) комбинированная математическая модель учитывает движение волны возмущения не только по воздуху, но и по формирователю, что позволяет учесть физику процесса и повышает точность определения ТП;

8) при испытаниях рекомендуется менять точку прицеливания для равномерного износа формирователя, крепление всех датчиков осуществлять через виброгасящие прокладки.

Анализ показал актуальность дальнейшего исследования и использования электронных акустических дозвуковых мишеней, особенно благодаря дешевизне датчиков и рамной конструкции, простоте пуско-наладочных работ и достаточно высокой точности измерения внешних баллистических параметров.

Библиографические ссылки

1. Эволюция электронных акустических мишеней: исследование сверхзвуковых математических моделей / С. Ф. Егоров, В. С. Казаков, В. А. Афанасьев, И. Г. Корнилов, И. В. Коробейникова // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 5. № 2. С. 86–93.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

6. Коробейников В. В. Модель дозвуковой акустической мишени // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 100–102.

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

8. Егоров С. Ф. Оптимизация расположения акустических датчиков в плоскости электронной мишени // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 2. С. 62–68.

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

10. Там же.

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

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

14. Коробейников В. В., Казаков В. С. Дозвуковая акустическая мишень для измерения координат точки попадания и скорости пули // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 104–107.

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

16. Там же.

17. Коробейников В. В., Казаков В. С. Выбор конструкции дозвуковой акустической мишени для физической модели информационно-измерительной системы // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 185–190.

References

1. Egorov S. F., Kazakov V. S., Afanasyev V. A., Kornilov I. G., Korobeynikova I. V. [Evolution of electronic acoustic targets: research of supersonic mathematical models]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 86–93 (in Russ.).

2. Egorov S. F., Kazakov V. S., Afanasyev V. A., Kornilov I. G., Korobeynikova I. V. Evolution of electronic acoustic targets: information and measuring systems for small arms. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 31 (4), pp. 104–110 (in Russ.).

3. Egorov S. F., Korobeynikov V. V., Kazakov V. S. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy oboronnoy naznacheniya: strelkovyye trenazhery i elektronnyye misheni* [Information and measuring systems of defensive appointment: shooting exercise machines and electronic targets]. *Mekhanika i fiziko-khimiya geterogennykh sred, nanosistem i novykh materialov : materialy nauchnykh issledovaniy* [Proc. Mechanics and fiziko-chemistry of heterogeneous environments, nanosystems and new ma-

terials. Materials of scientific research]. Izhevsk, 2015, pp. 328–349 (in Russ.).

4. Egorov S. F., Korobeynikova I. V., Korobeynikov V. V. [Research of influence on the accuracy of an acoustic target, invariant to a working position of mathematical model]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2015, no. 27 (3), pp. 45–49 (in Russ.).

5. Korobeynikov V. V., Korobeynikova I. V. [Mathematical model of a universal supersonic acoustic target]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2012, no. 55(3), pp. 101–103 (in Russ.).

6. Korobeynikov V. V. Model of a subsonic acoustic target. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2011, no. 49(1), pp. 100–102 (in Russ.).

7. Korobeynikov V. V. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy na osnove akusticheskikh mishenei* [Information and measuring systems on the basis of acoustic targets]. (PhD Thesis), Izhevsk, 1999 (in Russ.).

8. Egorov S. F. [Optimization of the arrangement of acoustic sensors in the plane of the electronic target]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 62–68 (in Russ.).

9. Korobeynikov V. V. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy na osnove akusticheskikh mishenei* [Information and measuring systems on the basis of acoustic targets]. (PhD Thesis), Izhevsk, 1999 (in Russ.).

10. Ibid.

11. Afanasyev V. A. [Damping of acoustic sensors in systems of tests for definition of the vnesheballisticheskikh of parameters]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2009, no. 45(3), pp. 137–139 (in Russ.).

12. Egorov S. F., Korobeynikova I. V. [Increase in accuracy of an acoustic target due to use of the weighed timepoints]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 24 (2), pp. 105–108 (in Russ.).

13. Kazakov V. S., Kazakov S. V. [Creation of measuring systems for small arms on modern technical base]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2010, no. 16 (2), pp. 134–138 (in Russ.).

14. Korobeynikov V. V., Kazakov V. S. [Subsonic acoustic target for measurement of coordinates of a point of hit and speed of a bullet]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2012, no. 55 (2), pp. 104–107 (in Russ.).

7. Korobeynikov V. V. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy na osnove akusticheskikh mishenei* [Information and measuring systems on the basis of acoustic targets]. (PhD Thesis), Izhevsk, 1999 (in Russ.).

16. Ibid.

17. Korobeynikov V. V., Kazakov V. S. [The choice of a design of a subsonic acoustic target for physical model of information and measuring system]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 21 (1), pp. 185–190 (in Russ.).

* * *

Evolution of Electronic Acoustic Targets: Research of Subsonic Mathematical Models

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU;
Udmurt Federal Research Center (Institute of Mechanics), Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

The paper presents the 25 years history of improvement of mathematical models of subsonic acoustic electronic targets at Computer facilities department of Kalashnikov ISTU and at Institute of Mechanics UdmFRC UB RAS; the models are widely used at enterprises for test and diagnostics of small arms to increase their accuracy. Models of targets with spatial placement of acoustic sensors, models with definition not only hit points, but also the object speed are shown, in each model reasonable simplifications of physical processes are analysed. The physical model considering distribution of indignation from a point of hit not only by air but also on the shaper rubber is investigated. 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, such as asymmetrical arrangement of acoustic sensors are given in target space at different distances for not degeneration of a system of the equations and an opportunity to use a standard four-channel digital oscillograph for communication, use of the weighed timepoints when processing signals from sensors for invariancy of orientation of sensors to a hit point, use of the damping laying for clearing of vibration hindrances from the shaper, use of secondary regression mathematical model for reduction of unaccounted errors. The conclusion is drawn on prospects of further researches and improvements of mathematical models, designs and element base of subsonic electronic acoustic targets on purpose increase in their accuracy, decrease in prime cost and, therefore, increase in competitiveness.

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

Получено: 09.07.18