

УДК 531.55+004.89

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-3-85-91

Интеллектуальная система автономного наведения и корректировки стрельбы из артиллерийской установки

С. А. Королев, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. Г. Нефедов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. Г. Русяк, академик РАН, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье представлены математические модели, численные алгоритмы и программный комплекс интеллектуальной системы автономного наведения и корректировки стрельбы из артиллерийской установки. В состав программного комплекса входят следующие компоненты: модуль решения прямой задачи внешней баллистики, модуль обучения нейронной сети и модуль наведения и корректировки стрельбы.

Первый модуль предназначен для формирования базы данных вычислительных экспериментов путем многократного решения прямой задачи внешней баллистики при варьируемых условиях стрельбы. Во втором модуле осуществляется обучение нейронной сети для решения обратной задачи внешней баллистики по сформированной базе данных вычислительных экспериментов. В третьем модуле реализованы алгоритмы расчета углов наведения артиллерийского орудия на цель с использованием обученной нейронной сети и расчета поправок к углам наведения по данным об отклонении точек падения снаряда от цели поражения.

В программном комплексе при получении данных о готовности артиллерийской установки к стрельбе, о координатах положения цели и координатах точки падения снаряда, получаемых от цифрового наблюдателя, рассчитываются необходимые углы наведения или поправки к ним. Данные об углах наведения в формате текстовых файлов передаются в систему управления приводами артиллерийской установки, производится выстрел и проводится оценка условия поражения цели. Затем алгоритм повторяется для следующего выстрела или новой цели.

Отработка и тестирование разработанных алгоритмов автономного наведения и корректировки стрельбы проводилась с помощью моделирования внешнебаллистических процессов в программном комплексе, а также путем экспериментальной апробации на рабочем макете артиллерийской установки. Разработанный программный комплекс позволяет визуализировать полученные результаты и сохранять историю проводимых операций.

Ключевые слова: внешняя баллистика, прямая и обратная задача, нейронная сеть, интеллектуальная система, наведение и корректировка стрельбы, программный комплекс.

Введение

Одной из актуальных задач при построении систем вооружения является обеспечение их эффективными алгоритмами наведения снарядов на цель. При использовании неуправляемых снарядов отсутствуют внешние средства управления, а точность поражения цели обеспечивается заранее определенными углами наведения артиллерийской установки, для чего требуется решить обратную задачу внешней баллистики.

Традиционным подходом при решении обратных задач является использование метода стрельбы [1], при котором решается прямая задача внешней баллистики для заданного диапазона значений варьируемых параметров и корректируются углы наведения по результатам отклонения от цели [2]. В этом случае требуется многократное интегрирование систем дифференциальных уравнений движения метаемых тел [3]. В боевой обстановке, в условиях ограничения времени, его может быть недостаточно для получения решения с необходимой точностью.

В этой связи предлагается способ определения углов наведения и корректировки стрельбы с использованием нейросетевой модели [4, 5], которая характеризуется быстротой получения решения обратной задачи, при этом для обучения нейронной сети могут использоваться данные натурального и/или вычислительного эксперимента.

Целью исследований является разработка интеллектуальной системы, которая позволит выполнять наведение и корректировку стрельбы в автономном режиме без участия оператора путем автоматического расчета координат прицеливания и их передачи в систему управления приводами артиллерийской установки.

Математические модели решения прямой и обратной задач внешней баллистики

При решении задач внешней баллистики рассматриваются следующие системы координат [6]:

– земная система координат $O_3x_3y_3z_3$ (рис. 1, а) с началом координат O_3 в некоторой точке позиционирования на местности; оси O_3x_3 и O_3z_3 располагаются в горизонтальной плоскости и направлены на север и восток соответственно, ось O_3y_3 направлена вертикально;

– стартовая система координат $O_cx_cy_cz_c$ (рис. 1, а, б) с началом координат O_c в точке расположения орудия; оси O_cx_c и O_cz_c располагаются в горизонтальной плоскости, O_cx_c ориентирована по направлению на цель, O_cz_c перпендикулярна O_cx_c , ось O_cy_c направлена вертикально.

Траектория движения снаряда рассчитывается в стартовой системе координат $O_cx_cy_cz_c$. Координаты

точек выстрела и падения снаряда при решении прямой и обратной задач определяются в земной системе координат $O_3x_3y_3z_3$.

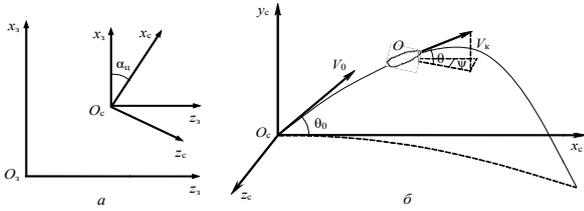


Рис. 1. Земная $O_3x_3y_3z_3$ и стартовая $O_cx_cy_cz_c$ системы координат

Fig. 1. Earth $O_3x_3y_3z_3$ and starting $O_cx_cy_cz_c$ coordinate systems

Переход от стартовой $O_cx_cy_cz_c$ к земной $O_3x_3y_3z_3$ системе координат осуществляется с помощью преобразования координат:

$$\begin{aligned} x_3 &= x_0 + x_c \cos \alpha_{ц} - z_c \sin \alpha_{ц}, \\ y_3 &= y_0 + y_c, \\ z_3 &= z_0 + x_c \sin \alpha_{ц} + z_c \cos \alpha_{ц}, \end{aligned}$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты точки расположения орудия в земной системе координат; $\alpha_{ц}$ – дирекционный угол цели по отношению к направлению на север.

Математические модели внешней баллистики основаны на законах движения метаемых тел в атмосфере и учитывают множество факторов, влияющих на траекторию. При расчете траектории интегрируется система дифференциальных уравнений, описывающих изменение координат снаряда и траекторных параметров под действием внешних сил.

Исходные данные, параметры и результаты решения прямой задачи внешней баллистики представим в виде преобразования [7]:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{P}_к, \tau_к) = \Phi_1(\mathbf{P}_0, V_0, \alpha_{ц}, \theta_0, \mathbf{A}), \quad (1)$$

где $\mathbf{P}_к = (x_к, y_к, z_к)$ – координаты точки падения снаряда, полученные в результате расчета траектории; $\tau_к$ – время полета снаряда; $\mathbf{P}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ – координаты точки расположения орудия; V_0 – начальная скорость снаряда; $\alpha_{ц}$ – дирекционный угол цели; θ_0 – начальное значение угла наклона траектории (угол стрельбы). Вектор \mathbf{A} содержит параметры, характеризующие баллистические, геофизические и метеорологические условия стрельбы.

Обратная задача заключается в нахождении обратного преобразования

$$\mathbf{z} = (\alpha_{ц}, \theta_0) = \Phi_2(\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_ц, V_0, \mathbf{A}), \quad (2)$$

где $\mathbf{P}_ц = (x_ц, y_ц, z_ц)$ – координаты цели.

Координаты точек падения снарядов и координаты цели при решении прямой (1) и обратной (2) задач будем определять в системе координат $O_3x_3y_3z_3$.

Параметры, заложенные в модели внешней баллистики, могут отличаться от параметров, реализуемых в эксперименте. Вследствие этого, координаты

падения снаряда, соответствующие углам наведения при решении задачи (2), могут отклоняться от цели:

$$\Delta \mathbf{P}_ц = \mathbf{P}_к - \mathbf{P}_ц,$$

где $\Delta \mathbf{P}_ц = (\Delta x_ц, \Delta y_ц, \Delta z_ц)$ – отклонение точки падения снаряда от цели.

На основе полученных отклонений точки падения снаряда от цели решается задача корректировки стрельбы. При этом производится уточнение углов наведения на цель $\alpha_{ц}, \theta_0$. Представим решение задачи корректировки стрельбы в виде преобразования

$$\mathbf{b} = (\Delta \alpha_{ц}, \Delta \theta_0) = \Phi_3(\Delta \mathbf{P}_ц, D, \mathbf{A}), \quad (3)$$

где $\Delta \alpha_{ц}, \Delta \theta_0$ – поправки к углам наведения на цель;

D – дальность стрельбы, $D = \sqrt{(x_ц - x_0)^2 + (z_ц - z_0)^2}$.

Отклонение снарядов от цели также связано с явлением рассеивания, присущим стрельбе из любой артиллерийской установки [8]. Задача определения параметров рассеивания решается на основе статистической обработки экспериментальных данных либо имитационного моделирования при известных допусках на параметры орудия и снарядов [9].

Размеры эллипса рассеивания представим в виде зависимостей

$$R_x = R_x(D), R_z = R_z(D), \quad (4)$$

где R_x, R_z – радиусы эллипса рассеивания на плоскости $O_cx_cz_c$ в направлениях O_cx_c и O_cz_c соответственно. В простейшем случае зависимости $R_x(D), R_z(D)$ можно принять в виде линейных функций $R_x(D) = k_x D, R_z(D) = k_z D$.

Численный алгоритм автономного наведения и корректировки стрельбы

Структурная схема системы автономного наведения и корректировки стрельбы из артиллерийской установки приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема системы наведения и корректировки стрельбы

Fig. 2. Structural scheme of the fire guidance and adjustment system

В состав системы входят следующие программные компоненты:

1. Блок определения цели и точек падения снарядов. Представляет собой программу, предназначен-

ную для определения координат цели и точек падения снаряда с использованием систем распознавания образов по видеоданным с камеры цифрового наблюдателя [10].

2. Интеллектуальная система наведения и корректировки стрельбы. Предназначена для расчета углов наведения и поправок к ним по полученным координатам цели и точек падения снарядов.

3. Блок управления приводами артиллерийской установки. Представляет собой программу для микроконтроллера, реализующую расчет необходимых импульсов, передаваемых приводам артиллерийской установки для осуществления поворотного движения в горизонтальной и вертикальной плоскости в соответствии с рассчитанными углами наведения.

Передача данных между программными компонентами осуществляется автоматически с использованием текстовых файлов, позволяя системе наведения и корректировки стрельбы работать в автономном режиме без участия оператора.

Центральный компонент – интеллектуальная система наведения и корректировки стрельбы – содержит следующие элементы: модуль решения прямой задачи внешней баллистики, модуль обучения нейронной сети и модуль наведения и корректировки стрельбы (рис. 3). Первые два модуля реализуют алгоритмы формирования и обучения нейронной сети по результатам расчета траекторий, третий модуль – алгоритмы расчета углов наведения и поправок к ним по полученным координатам цели и точек падения снарядов. Рассмотрим подробнее назначение данных модулей и их взаимодействие друг с другом.

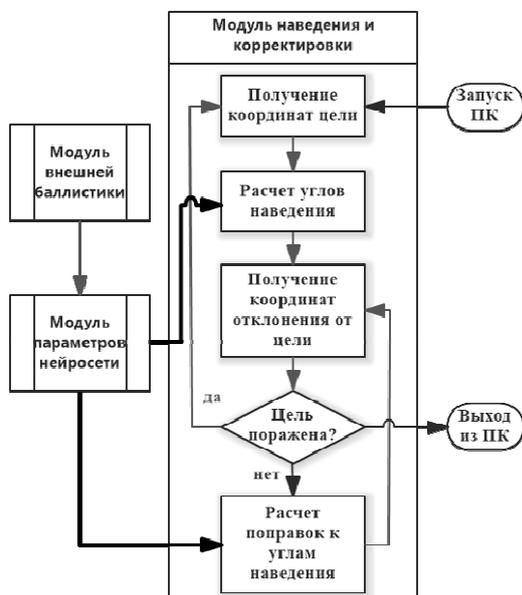


Рис. 3. Блок-схема алгоритма автономного наведения и корректировки стрельбы

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for autonomous guidance and shooting correction

Первый модуль предназначен для формирования базы данных вычислительных экспериментов путем многократного решения прямой задачи при варьиро-

вании углов $\alpha_{ц}$ и θ_0 , температуры T_a и давления P_a воздуха, направления α_w и скорости w ветра и других параметров:

$$(\mathbf{x}^h; \mathbf{y}^h) = \left(\begin{array}{l} x_0^h, y_0^h, z_0^h, V_0^h, \alpha_{ц}^h, \theta_0^h, T_a^h, \\ P_a^h, \alpha_w^h, w^h, \dots; x_k^h, y_k^h, z_k^h, \tau_k^h \end{array} \right), h = \overline{1, H}, \quad (5)$$

где H – количество экспериментов.

Второй модуль предназначен для формирования базы знаний интеллектуальной системы наведения и корректировки стрельбы. Для построения таких баз знаний эффективно применяются методы аппроксимации сложных нелинейных функций с большим количеством переменных [11, 12]. В данном модуле используется многослойная нейронная сеть [13, 14], обучение которой производится на выборке данных вычислительных экспериментов первого модуля. При наличии данных натурального эксперимента нейросеть дообучается на реальных параметрах артиллерийской системы. Для реализации нейронной сети применялась библиотека Keras (URL: <https://www.tensorflow.org/guide/keras>) с алгоритмом оптимизации Adam [15, 16]. На основе исследования точности аппроксимации и скорости обучения выбраны следующие параметры нейронной сети: 3 внутренних слоя по 24 нейрона, количество итераций алгоритма обучения не превышает 1000 итераций на выборку из 4000 вычислительных экспериментов. При этом ошибка решения обратной задачи равна 0,3 %, что составляет $0,135^\circ$ для заданного интервала изменения углов $\alpha_{ц} \in [-20; 20^\circ]$, $\theta_0 \in [0; 45^\circ]$.

В третьем модуле реализуются алгоритмы определения углов наведения артиллерийской установки и поправок к ним с использованием базы знаний, полученной во втором модуле, и представленной рассчитанными весовыми коэффициентами нейронных сетей.

Для определения величины отклонения $\Delta P_{ц} = (\Delta x_{ц}, \Delta y_{ц}, \Delta z_{ц})$ используется высокоскоростная видекамера. Требования к параметрам оборудования видеосъемки для обеспечения необходимой точности фиксации движущегося объекта рассмотрены в работе [17]. При проведении натуральных испытаний камера устанавливалась на высокий штатив, позиционирование на местности проводилось по двум точкам, расположенным по краям области фиксации изображения.

Общий алгоритм работы интеллектуальной системы управления стрельбой следующий:

- 1) в систему управления стрельбой вводятся координаты установки (x_0, y_0, z_0) и цели $(x_{ц}, y_{ц}, z_{ц})$ в земной системе координат;
- 2) путем решения обратной задачи для предполагаемых условий стрельбы определяются углы наведения $(\alpha_{ц}, \theta_0)$, данные передаются в систему управления приводами наведения метательной установки;
- 3) выполняется выстрел;
- 4) в системе оценки поражения мишени определяется отклонение точки падения снаряда от цели

$(\Delta x_{ц}, \Delta y_{ц}, \Delta z_{ц})$, данные передаются в систему управления стрельбой;

5) если отклонение от цели не выходит за границы эллипса рассеивания (выполняется условие

$$\left(\frac{\Delta x_{ц}}{R_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z_{ц}}{R_z}\right)^2 \leq 1, \quad R_x, R_z - \text{ радиусы эллипса}$$

рассеивания по координатным направлениям), то выстрел считается «точным», переход к п. 1 (выбор новой цели) или к п. 3 (стрельба по текущей цели), в противном случае производится корректировка стрельбы, переход к п. 6;

б) из решения задачи корректировки стрельбы определяются поправки к углам наведения $(\Delta \alpha_{ц}, \Delta \theta_0)$, данные передаются в систему управления приводами наведения метательной установки, переход к п. 3.

Алгоритм наведения и корректировки стрельбы с использованием искусственных нейронных сетей реализован в программном комплексе, интерфейс которого представлен на рис. 4 [18].

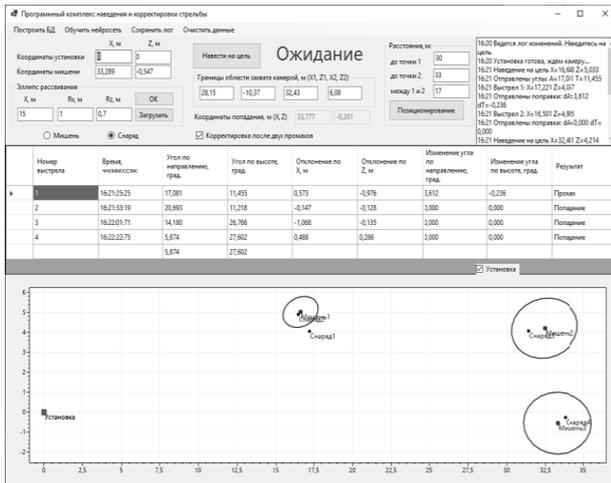


Рис. 4. Главное окно программного комплекса автономного наведения и корректировки стрельбы

Fig. 4. Main window of the software package for autonomous guidance and shooting adjustments

Программный комплекс имеет графический интерфейс пользователя для настройки параметров решения задач внешней баллистики, обучения и настройки параметров нейронной сети. Визуальное сопровождение результатов работы алгоритма наведения и корректировки стрельбы реализуется с использованием библиотеки ScottPlot (URL: <https://scottplot.net/>). История проводимых операций выводится на экран пользователя и сохраняется в текстовом файле.

Тестирование разработанного алгоритма автономного наведения и корректировки стрельбы. Анализ полученных результатов

Отработка и тестирование разработанных алгоритмов автономного наведения и корректировки стрельбы и программного комплекса в целом проводились путем моделирования внешнебаллистических

процессов с учетом влияния различных факторов на точность решения задачи.

Основные возможности интеллектуальной системы рассмотрим на примере решения следующих задач.

1. Наведение и корректировка стрельбы по одиночной мишени.

Рассмотрим случай, когда предполагаемые параметры модели и фактические параметры в эксперименте отличаются. Модель внешней баллистики построена для следующих параметров: начальная скорость снаряда $V_0 = 50$ м/с, параметры атмосферы соответствуют стандартным условиям $T_a = 15^\circ\text{C}$, $P_a = 750$ мм рт. ст., ветер отсутствует $w = 0$, $\alpha_w = 0$. В отличие от модельных условий, в эксперименте 1 реализуются следующие условия: начальная скорость снаряда $V_0 = 51,5$ м/с, скорость ветра $w = 2$ м/с, направление ветра $\alpha_w = 250^\circ$, а в эксперименте 2 – $V_0 = 54$ м/с, $w = 5$ м/с, $\alpha_w = 250^\circ$.

Визуализация результатов моделирования процесса стрельбы по одиночной мишени представлена на рис. 5. Последовательность координат точек падения снарядов отображается на графиках. Для оценки условия попадания снаряда в цель строится область рассеивания снарядов относительно центра мишени.

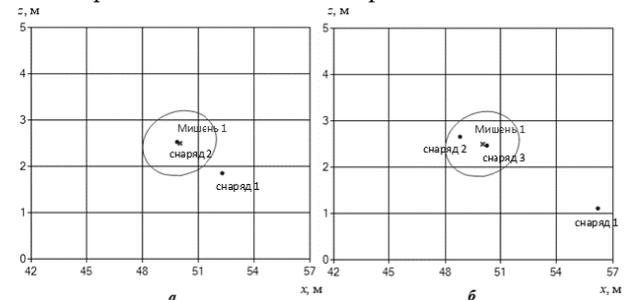


Рис. 5. Результаты моделирования стрельбы по одиночной мишени (параметры модели: $V_0 = 50$ м/с, $w = 0$, $\alpha_w = 0$) при различных условиях эксперимента: а – эксперимент 1 ($V_0 = 51,5$ м/с, $w = 2$ м/с, $\alpha_w = 250^\circ$); б – эксперимент 2 ($V_0 = 54$ м/с, $w = 5$ м/с, $\alpha_w = 250^\circ$)

Fig. 5. Results of modeling of shooting at a single target (model parameters: $V_0 = 50$ m/s, $w = 0$, $\alpha_w = 0$) under different experimental conditions: а) experiment 1 ($V_0 = 51.5$ m/s, $w = 2$ m/s, $\alpha_w = 250^\circ$); б) experiment 2 ($V_0 = 54$ m/s, $w = 5$ m/s, $\alpha_w = 250^\circ$)

Вследствие различия модельных и фактических параметров внешней баллистики наблюдается отклонение первого снаряда от цели. На основе данных о величине промаха, полученных в системе оценки поражения мишени, путем решения задачи корректировки стрельбы производится уточнение параметров наведения на цель.

Как видно из рис. 5, количество скорректированных выстрелов до момента попадания в мишень зависит от уровня различий параметров модели и эксперимента. В эксперименте 1 достаточно одной корректировки параметров наведения для точного попадания в мишень (рис. 5, а), в эксперименте 2 требуются две итерации алгоритма корректировки

параметров наведения для лучшей адаптации параметров модели к условиям эксперимента (рис. 5, б).

2. Наведение и корректировка стрельбы по группе мишеней.

В данном случае модель внешней баллистики построена для следующих параметров: $V_0 = 50$ м/с, $w = 0$, $\alpha_w = 0$, фактические условия стрельбы, реализуемые в эксперименте: $V_0 = 53$ м/с, $w = 2$ м/с, $\alpha_w = 250^\circ$. Стрельба производится по группе, состоящей из 4 мишеней, координаты которых представлены в таблице.

Координаты группы мишеней

Target group coordinates

Номер мишени	1	2	3	4
Координаты:				
x , м	50,0	53,0	37,0	40,0
z , м	5,0	-7,0	4,0	-5,0

На рис. 6 представлены результаты моделирования в программном комплексе последовательной стрельбы по группе мишеней. В начале процесса стрельбы для первой мишени производится корректировка углов наведения. При этом параметры модели настраиваются на фактические условия в эксперименте. После поражения первой мишени производится наведение на следующую мишень. Как видно из рис. 6, поражение второй и последующих мишеней происходит практически с первого выстрела.

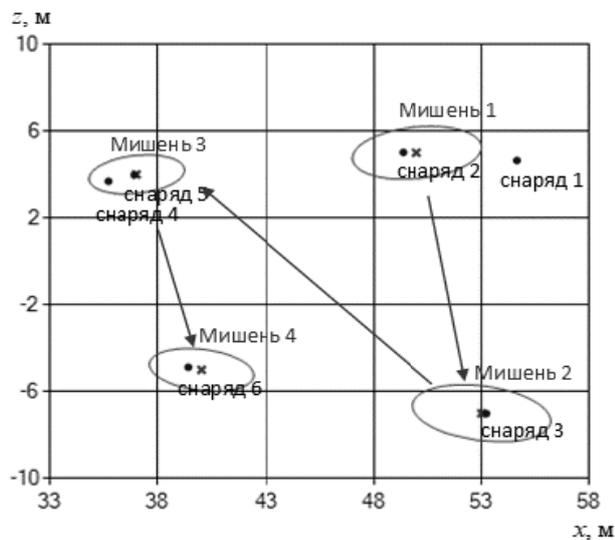


Рис. 6. Результаты моделирования стрельбы по группе мишеней

Fig. 6. Results of modeling of shooting at a group of targets

3. Наведение и корректировка стрельбы с учетом рассеивания снарядов.

В данном случае в математической модели внешней баллистики генерируются случайные отклонения условий выстрела, приводящие к рассеиванию точек падения снарядов. По результатам имитационного моделирования определены зависимости размеров эллипса

рассеивания от дальности: $R_x = 0,044D$, $R_z = 0,009D$, для $D = 50$ м: $R_x = 2,2$ м, $R_z = 0,45$ м.

Результаты моделирования стрельбы по одиночной мишени с учетом рассеивания снарядов представлены на рис. 7.

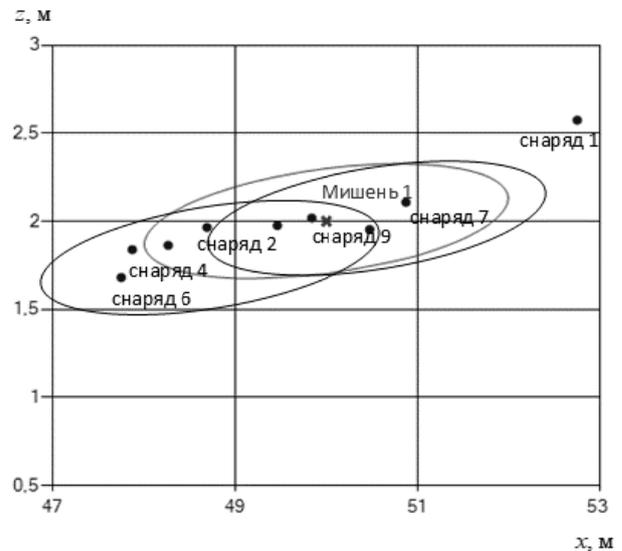


Рис. 7. Результаты моделирования стрельбы с учетом рассеивания снарядов

Fig. 7. Results of modeling of shooting taking into account the dispersion of projectiles

При учете эффекта рассеивания снарядов отклонение точек падения от цели может быть вызвано как систематическими ошибками наведения, так и случайными факторами. В этом случае алгоритмы корректировки стрельбы содержат адаптивные процедуры анализа количества и частоты промахов для принятия решения о необходимости проведения корректировки параметров наведения на цель.

В простейшем случае анализ необходимости проведения корректировки выполняется по следующей схеме:

а) при однократном промахе считается, что отклонение снарядов от цели случайное, корректировка не требуется;

б) при двух промахах подряд считается, что отклонение снарядов систематическое, необходима корректировка параметров наведения.

Проверка адекватности математических моделей и работоспособности разработанных алгоритмов и программного комплекса проводилась при сравнении результатов моделирования с данными, полученными в ходе экспериментов на рабочем макете баллистической установки. Для диапазона начальных скоростей снаряда 30–60 м/с и дальности стрельбы до 100 м результаты натурного эксперимента хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. Адаптивность нейросетевых моделей к параметрам и условиям задачи внешней баллистики позволяет использовать разработанные алгоритмы для реальных артиллерийских систем в различных условиях проведения стрельбы.

Заключение

Представленная система автономного наведения и корректировки стрельбы направлена на повышение автоматизации процессов управления стрельбой из артиллерийской установки. Это позволит увеличить эффективность поражения целей неуправляемыми снарядами за счет повышения скорости принятия решений и исключения ошибок наведения. Приведенные алгоритмы, основанные на методах интеллектуального анализа данных, обеспечивают высокую оперативность и точность решения задач наведения стрельбы по одиночной и групповой целям, учитывая влияние различных факторов при корректировке стрельбы.

Библиографические ссылки

1. Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. М. : МГТУ им. Баумана, 2020. 328 с. ISBN 978-5-7038-5503-4.
2. Полевой Ю. И. Способ наведения орудия на цель. Патент RU 2743597 С1, 20.02.2021.
3. Мокшанов П. Ю., Зотов П. Ю., Майоров П. Е. и др. Определение установок для стрельбы из артиллерийских орудий неуправляемыми снарядами на основе интегрирования системы дифференциальных уравнений движения неуправляемых снарядов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020614093, 26.03.2020.
4. Разработка подходов к решению обратной задачи внешней баллистики в различных условиях применения / С. А. Королев, А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. А. Тенев // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 57. С. 76–83. DOI 10.17223/19988621/57/6.
5. Волков А. Г., Павловский И. С., Бородин И. В. Нейросетевая модель прогнозирования технического состояния сложного динамического объекта // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 4. С. 201–206.
6. Численное моделирование артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем : монография / А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. А. Тенев, В. Г. Суфиянов, С. А. Королев, М. Н. Белобородов. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2023. 416 с. ISBN: 978-5-4344-0966-7.
7. Королев С. А., Неведов Д. Г., Вологов Д. С. Интеллектуальная система управления стрельбой из артиллерийского вооружения. // Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов : труды 19-й Всероссийской научно-технической конференции. Нижний Тагил, 2023. С. 150–158.
8. Балганский И. А. Основы баллистики и аэродинамики. Новосибирск : НГТУ, 2017. 200 с. ISBN 978-5-7782-3412-3.
9. Королев С. А. Методика имитационного моделирования рассеивания снарядов // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 1. С. 57–62. DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-57-62.
10. Acremont A., Fablet R., Baussard A., Quin G. CNN-Based Target Recognition and Identification for Infrared Imaging in Defense Systems. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 2040. DOI: 10.3390/s19092040.
11. Терлецкий А. С., Терлецкая Е. С. Нейронные сети и искусственный интеллект: основы нейронных сетей на языке Python. Липецк : ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, 2023. 76 с. ISBN 978-5-907792-40-1.
12. Тенев В. А., Шаура А. С. Решение задач нелинейного программирования общего вида генетическим алгоритмом // Интеллектуальные системы в производстве.

2019. Т. 17. № 4. С. 137–142. DOI 10.22213/2410-9304-2019-4-137-142.

13. Шрайнер Б. А., Розов К. В. Введение в искусственный интеллект. Новосибирск : НГПУ, 2021. 101 с. ISBN 978-5-00104-722-3.

14. Rashka S. Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, Scikit-Learn, and TensorFlow 2. Packt Publishing, 2019. 770 p.

15. Zhuang J., Tang T., Ding Y., Tatikonda S., Dvornek N., Papademetris X., Duncan J. AdaBelief Optimizer: Adapting Stepsizes by the Belief in Observed Gradients // *NeurIPS*, 2020. DOI 10.48550/arXiv.2010.07468.

16. Сравнение методов обучения нейронных сетей в задаче классификации / А. С. Перков, Т. Р. Жангиров, А. А. Лисс, Н. Ю. Григорьева, Л. А. Чистякова // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 6. С. 53–61.

17. Чирков Д. В., Федорова Е. А. К вопросу определения характеристик движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 53–63. DOI 10.22213/2413-1172-2021-1-53-63.

18. Королев С. А., Неведов Д. Г., Русяк И. Г. Программа расчета углов наведения и корректировки стрельбы на основе интеллектуального анализа данных о положении цели и отклонений снарядов от цели. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023615914, 20.03.2023.

References

1. Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow: Bauman MSTU publ., 2020, 328 p. (in Russ.).
2. Polevoy Yu.I. *Sposob navedeniya orudiya na tsel'* [A method of aiming a weapon at a target]. Patent RF no. 2743597 C1, 2021 (in Russ.).
3. Mokshanov P.Yu., Zotov P.Yu., Mayorov P.E. et al. *Opreделение ustanovok dlya strel'by iz artilleriiskikh orudii neupravlyaemyimi snaryadami na osnove integrirovaniya sistemy differentsial'nykh uravnenii dvizheniya neupravlyaemykh snaryadov* [Determination of installations for firing unguided projectiles from artillery guns based on the integration of a system of differential equations of motion of unguided projectiles]. Certificate of registration of a computer program RU 2020614093, 2020 (in Russ.).
4. Korolev S.A., Lipanov A.M., Rusyak I.G., Tenenev V.A. [Development of the approaches for solving an inverse problem of external ballistics in various application conditions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2019, no. 57, pp. 76-83 (in Russ.). DOI 10.17223/19988621/57/6.
5. Volkov A.G., Pavlovsky I.S., Borodin I.V. *Neirosetevaya model' prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnogo dinamicheskogo ob'ekta* [Neural network model for predicting the technical condition of a complex dynamic object] // DSPA: Issues in the use of digital signal processing, 2018, vol. 8, no. 4, p. 201-206 (in Russ.).
6. Lipanov A.M., Rusyak I.G., Tenenev V.A., Sufiyarov V.G., Korolev S.A., Beloborodov M.N. *Chislennoe modelirovaniye artilleriiskogo vystrela s primeneniem vizual'nykh tekhnologii dlya proektirovaniya i otrabotki artilleriiskikh sistem* [Numerical modeling of an artillery shot using visual technologies for the design and testing of artillery systems]. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Research, 2023, 416 p. (in Russ.).
7. Korolev S.A., Nefedov D.G., Volegov D.S. [Intelligent artillery shooting control system]. *Proektirovaniye sistem vooruzheniya i izmeritel'nykh kompleksov. Trudy 19*

Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Nizhnij Tagil, 2023, p. 150-158. (in Russ.).

8. Balagansky I. A. *Osnovy ballistiki i aerodinamiki* [Fundamentals of ballistics and aerodynamics]. Novosibirsk: NSTU Publ., 2017, 200 p. (in Russ.).

9. Korolev S.A. [Simulation method of projectiles dispersion]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 57-62 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-57-62.

10. Acremont A., Fablet R., Baussard A., Quin G. CNN-Based Target Recognition and Identification for Infrared Imaging in Defense Systems. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 2040. DOI: 10.3390/s19092040.

11. Terletskii A.S., Terletskaya E.S. *Neironnyye seti i iskusstvennyi intellekt: osnovy neuronnykh setei na yazyke Python* [Neural Networks and Artificial Intelligence: Neural Network Basics in Python]. Lipetsk, Semenov-Tyan-Shansky LSPU, 2023, 76 p. (in Russ.).

12. Tenenev V.A., Shaura A.S. [Solving general nonlinear programming problems with a genetic algorithm]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, 2019, vol. 17, no. 4, pp. 137-142 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2019-4-137-142.

13. Shrainer B.A., Rozov K.V. *Vvedenie v iskusstvennyi intellekt* [Introduction to Artificial Intelligence]. Novosibirsk, NSPU, 2021, 101 p. (in Russ.).

14. Rashka S. *Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, Scikit-Learn, and TensorFlow 2*. Packt Publishing, 2019. 770 p.

15. Zhuang J., Tang T., Ding Y., Tatikonda S., Dvornek N., Papademetris X., Duncan J. AdaBelief Optimizer: Adapting Stepsizes by the Belief in Observed Gradients // *NeurIPS*, 2020. DOI 10.48550/arXiv.2010.07468.

16. Perkov A.S., Zhangiroy T.R., Liss A.A., Grigoryeva N.Yu., Chistyakova L.V. [Comparison of neural network training methods in the classification problem]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2019, no. 4, pp. 53-61 (in Russ.).

17. Chirkov D.V., Fedorova E.A. [To the Question of Determining the Characteristics of the Object Motion Based on High-Speed Video Recording]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 53-63 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2021-1-53-63.

18. Korolev S.A., Nefedov D.G., Rusyak I.G. *Programma rascheta uglov navedeniya i korrekcirovki strel'by na osnove intellektual'nogo analiza dannyh o polozenii celi i otklonenij snarjadov ot celi* [A program for calculating pointing angles and adjusting shooting based on intelligent analysis of data on the target position and deviations of projectiles from the target]. Certificate of registration of a computer program RU 2023615914, 2023 (in Russ.).

* * *

Intelligent System for Artillery Mount Autonomous Guidance And Firing Adjustment

S. A. Korolev, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

D. G. Nefedov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

I. G. Rusyak, RAMAS Academician, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article presents mathematical models, numerical algorithms and a software package for an intelligent system for artillery mount autonomous guidance and adjustment of firing. The software package includes the following components: a module for solving the direct problem of external ballistics, a neural network training module, and a firing guidance and adjustment module.

The first module is designed to form a database of computational experiments by repeatedly solving the direct problem of external ballistics under varying firing conditions. In the second module, a neural network is trained to solve the inverse problem of external ballistics using the database generated from computational experiments. The third module implements algorithms for calculating the artillery mount launching angles on a target using a trained neural network and calculating corrections to launching angles based on data on the projectile impact point deviation from the target.

Having received data on the artillery mount readiness to fire, the coordinates of the target position and projectile's impact point received from a digital observer, the software package calculates the necessary launching angles or corrections to them. Launching angles are transferred via text files to the control system of the artillery mount drives, then a shot is fired and the conditions for hitting the target are assessed. The algorithm is then repeated for the next shot or new target.

Testing of the developed algorithms for autonomous guidance and shooting correction was carried out using modeling of external ballistics processes in the software package, as well as carrying out experimental testing on a working simulation device of an artillery mount. The developed software package allows visualization of the obtained results and saving the history of the performed operations.

Keywords: external ballistics, direct and inverse problem, neural network, intelligent system, firing guidance and adjustment, software package.

Получено: 23.04.24

Образец цитирования

Королев С. А., Нефедов Д. Г., Русяк И. Г. Интеллектуальная система автономного наведения и корректировки стрельбы из артиллерийской установки // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 3. С. 85–91. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-3-85-91.

For Citation

Korolev S.A., Nefedov D.G., Rusyak I.G. [Intelligent system for artillery mount autonomous guidance and firing adjustment]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 85-91. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-3-85-91.