

УДК 004.928+004.421

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-70-81

Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение анимации мишенной обстановки

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент,
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Описывается математическое обеспечение анимации мишенной обстановки по изображению стрельбища с экранированием близлежащими объектами и без мерцания для тактического оптико-электронного тренажера стрелкового оружия «Ингибитор», разработанного в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников».

Приводится тактико-техническое задание на реализацию реалистичной анимации мишенной обстановки: поддержка всех упражнений из Курса стрельб с появляющимися-исчезающими и движущимися мишенями по поверхности стрельбища с местными объектами, которые экранируют их, как и складки местности и другие мишени. Движения должны быть реалистичными по скорости и угловым размерам мишеней, плавными без дерганья и соответствовать сценарию упражнений из Курса стрельб: мишени до 2 м/с, бронетехника до 4 м/с под углом 15–20° от максимальных дальностей к минимальным. Должна поддерживаться частота анимации не менее 25 кадров/с с приоритетом мишенной обстановки (минимум до 32 одновременно) над спецэффектами и местными объектами. Проведенные исследования точности позиционирования анимированных мишеней при сильном уменьшении их размеров на больших дальностях для обеспечения реалистичности прицеливания по таким изображениям подтвердили соответствие требованиям ТТЗ (существенно меньше 0,3 тысячных дальности или 1,5 мм).

Исходя из перспективности дальнейших исследований и разработки электронных стрелковых тренажеров и благодаря совершенствованию вычислительных средств и развитию программных графических библиотек необходимо расширять функциональные возможности тренажеров и снижать себестоимость, а значит, повышать конкурентоспособность, например, за счет реалистичности анимации мишенной обстановки.

Ключевые слова: стрелковый тренажер, система координат, математическая модель, спрайтовая анимация, экранирование объектов.

Введение

Разработка электронных стрелковых тренажеров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) с реалистичной мишенной обстановкой [1–8] и поддержкой как упражнений Курса стрельб, так и самостоятельно созданных, является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует и производства тренажера для привития навыков прицеливания и стрельбы. Тренажер может быть просто механической насадкой на боевое изделие (например, командирский ящик КЯ-83 или ПУС-7), но электронные лазерные тренажеры, безусловно, обладают большими функциональными возможностями.

Стрелковый тренажер «Ингибитор» разрабатывался и модифицировался в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников» и принят на вооружение под индексом 1У33 [9–11]. Нарботки в настоящее

время используются для следующего семейства тренажеров [12].

Актуальность дальнейшего исследования и разработки электронных стрелковых тренажеров основана на высокой эффективности тренажеров и мультимедийных тиров особенно на первоначальном этапе обучения стрельбе для постановки правильной стойки, хвата, дыхания, удержания оружия, прицеливания, производства плавного спуска курка и отражена в работах [13–22]. Кроме этого, тренажеры отличаются безопасностью тренировок и быстрой окупаемостью по сравнению с войсковыми стрельбищами и боевыми тирами.

Целью статьи является описание и исследование алгоритмов плавного и реалистичного перемещения мишеней по рельефу стрельбища при реализации сценариев стрелковых упражнений с экранированием близлежащими объектами и с появлением-исчезновением мишеней согласно сценариям для тактического оптико-электронного тренажера стрелкового оружия «Ингибитор».

Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ (см. работу С. Ф. Егорова в данном журнале № 2 за 2019 г.) к анимации мишенной обстановки фактически сводятся к естественной реалистичности изменяемой мишенной обстановки:

1. Видимые размеры отображаемых мишенной должны полностью соответствовать на всех используемых дистанциях угловым размерам реальным.

2. Движущиеся мишени должны изменять свои размеры при изменении расстояния до них плавно, без видимых рывков и существенных изменений их формы. При этом одновременно должны поддерживаться до 4 мишеней для 8 рабочих мест тренажера (т. е. до 32 одновременных движущихся мишеней).

3. Объекты, расположенные ближе, должны перекрывать изображения более дальних объектов (как и складки местности) – экранирование.

4. Согласно сценариям упражнений цели должны появляться и исчезать (в том числе исчезать при поражении).

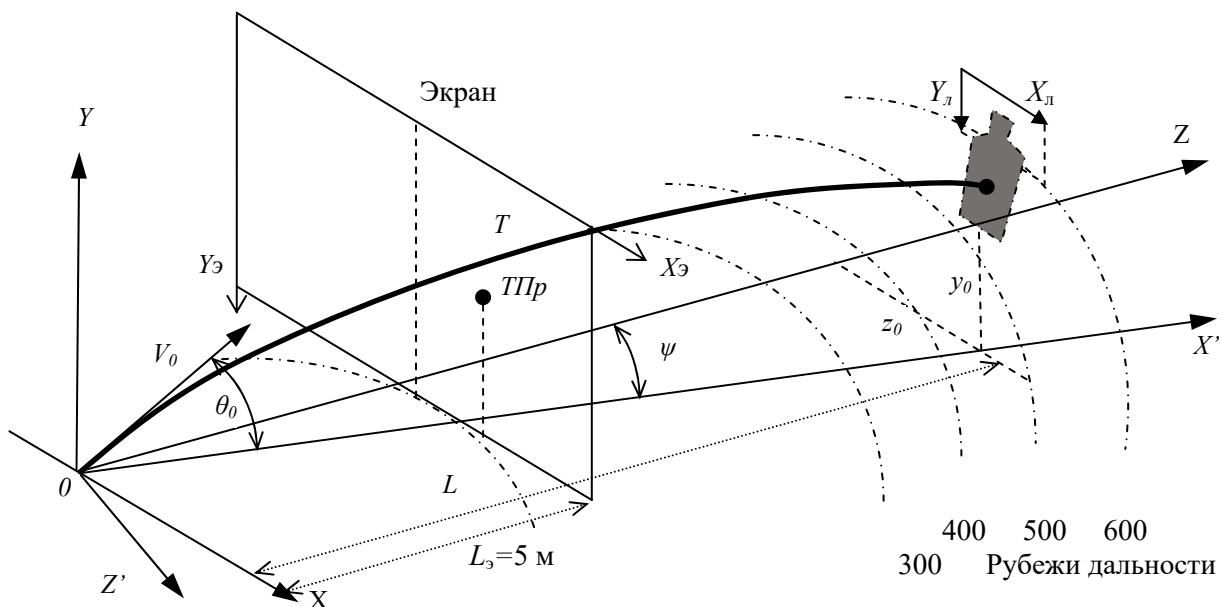
5. Алгоритм анимации мишенной обстановки не должен давать погрешность визуального прицеливания выше 0,3 тысячных дальности.

Таким образом, основные задачи создания математического обеспечения анимации мишенной обстановки является разработка алго-

ритмов для плавного перемещения множества мишеней и целей без мерцания изображений (со своей структурой данных), с появлением-исчезновением согласно сценарию стрелкового упражнения и с визуальным экранированием другими местными объектами, а также исследование разработанных алгоритмов на визуальную точность позиционирования целей (реалистичность прицеливания).

Системы координат мишенной обстановки

Изображение мишенной обстановки стрелкового упражнения от центральной ЭВМ через проекторы передается на составной проекционный экран размером $6,6 \times 1,65$ м, который расположен на расстоянии $L_s = 5$ м от рабочих мест (см. работы С. Ф. Егорова в этом журнале за 2023 г.) с угловым размером пикселя экрана $0,39$ т. д. (тысячных дальности) или $1,34'$ (угловых минуты) и масштабом в $2,15$ мм/рпх. Согласно упражнениям курса стрельб необходимо отображать цели, движущиеся под малым углом к плоскости стрельбы ($15-20^\circ$) с малыми скоростями (4 м/с для бронетехники, менее 2 м/с для пехоты) на дальностях от 100 до 2000 м. 2D-мишени представляют собой изображения условных зеленых фигур на «прозрачном фоне» размерами согласно приложению Курсу стрельб, а 2D-цели сделаны на основе реальных фотографий с фазами движений с размерами близкими к размерам соответствующих мишеней.



Траектория пули T в направлении ТПр и проходящая через ТП (y_0, z_0) : V_0 – начальная скорость; ψ – угол курса; θ_0 – угол бросания; L – дальность

Рис. 1. Системы координат и баллистическая траектория

Fig. 1. Coordinate Systems and Ballistic Trajectory

Алгоритм анимации опирается на четыре системы координат (СК, рис. 1):

1. 3D СК стрельбища XYZ (СКс), где задается рельеф и положение мишеней. Модель стрельбища хранится в виде матрицы высот (координаты Y) с шагом 10 м размером 2×2 км (200×200 ячеек), что вполне достаточно для передачи особенностей реального рельефа (холмы, овраги), а окопы и укрытия для целей реализованы с помощью высоты мишеней над рельефом (которая может быть отрицательной и динамически меняться). Начало координат (0,0,0) на мушке имитатора оружия (ИО) стрелка в положении лежа посередине экрана.

2. 2D СК экрана X, Y , (СКэ), на которой отображается стрельбище с мишенями (фактически центральная проекция СКс) и определяется точка прицеливания (ТПр) по лазерному пятну, начало координат (0,0) в верхнем левом углу.

3. 3D СК баллистики $X'YZ'$ (СКб) с началом координат как и у СКс, но которая может вращаться вокруг оси Y для пересчета координат баллистической траектории к ТПр по углам

курса Ψ в координаты СКс для дальнейшего решения «задачи встречи».

4. Мишени хранятся в локальной СК (СКл), для 2D-мишеней используются только две координаты $X_l Y_l$, с масштабом $1 \text{ pix} = 1 \text{ см}^2 = 2,15 \times 2,15 \text{ мм}$ и плоскость мишени считается всегда перпендикулярной траектории выстрела (как и линии прицеливания). Координаты мишени из СКл постоянно пересчитываются в СКб простым переносом. А потом из СКб в СКс поворотом.

Формат упражнений описывает положения мишеней в XYZ, когда мишени расположены по дальностям Z и со смещением по фронту X для 8 рабочих мест (рис. 2), а Y – высота мишени над рельефом стрельбища. Но для обеспечения равного расстояния от стрелка в начале координат до мишени координаты фактически преобразуются в радиальные AYR (угол, высота, радиус-рубеж, рис. 1, 2) и пересчитываются в новые координаты X'' и Y'' СКс по расстоянию по формулам (рис. 2, «Мишень 1») – получаются круговые рубежи дальности мишеней.

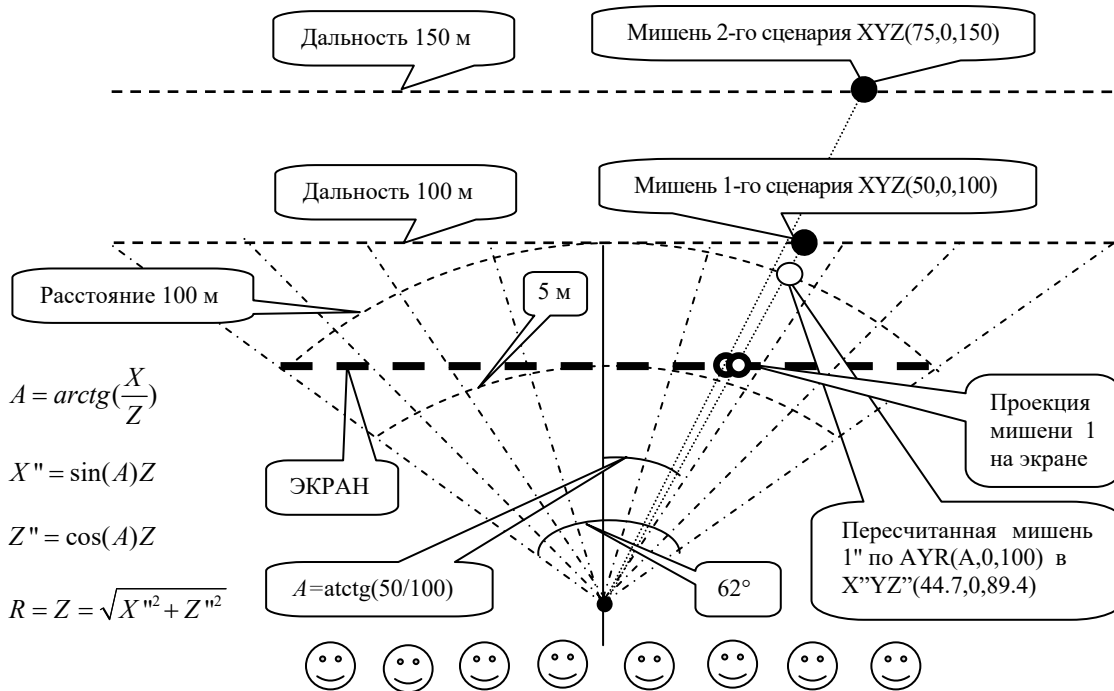


Рис. 2. Пересчет координат мишеней (вид сверху)

Fig. 2. Recalculation of target coordinates (top view)

Итак, ПО тренажера в СКэ получает координаты ТПр и отрисовывает мишенную обстановку на экране алгоритмом анимации. В СКб просчитываются координаты баллистической траектории с шагом 0,2 м с превышениями линии прицеливания (координата Y , естественно учитывается угол курса Ψ через поворот вокруг оси

Y и угол места цели через угол бросания), ветровыми отклонениями (координата Z') и временами полета до рубежей (координата X'). В СКс просчитывается изменяемая мишенная обстановка из СКл с учетом рельефа, ось Z идет от мушки ИО (из положения лежа) перпендикулярно экрану вдаль, ось Y идет от мушки ИО

вверх, а ось X вправо, внутренние единицы измерения 1 см (вещественный). СКб с просчетом баллистической траектории накладываемся на СКс заменой координат $X \leftrightarrow Z$ и поворотом на угол курса ψ вокруг оси Y .

Таким образом, математическая модель экрана – это цилиндрическая поверхность с равным расстоянием до центрального виртуального рабочего места, но физически экран плоский для удобства всех 8 рабочих мест (расположенных через 80 см, рис. 2). Каждый стрелок как бы находится в виртуальном рабочем месте, лежа по центру экрана, но реально работает с мишенями напротив себя на экране (для упражнений по Курсу стрельб, кроме разведки местности и действия отделения в обороне, где работает со всеми мишенями).

Алгоритм выполнения упражнения

Алгоритм выполнения стрелкового упражнения, составной частью которого является алгоритм анимации мишенной обстановки, включает в себя подготовительные операции, циклические и завершающие. Подготовительные, в свою очередь, делятся на однократные и предварительные.

Однократные операции выполнения сценария включают:

1. Создание базы мишеней, целей и местных объектов: с ответным огнем, движением и поражением, с реакцией на ветер и ракурсами (псевдо-3D).

2. Создание базы стрельбищ с рельефом: равнинных/горных/городских/степных, для всех сезонов, с туманом.

3. Создание базы сценариев упражнений из Курса стрельб и не только.

4. Создание базы ИО: начальная скорость, баллистический коэффициент, типы боеприпасов и поражение, виды прицелов и высота мушки, углы бросания прицелов, реакция на ветер, набор датчиков (например, магазина, свала, срыва) и т. д.

В рамках Курса стрельб стрелкового оружия все базы мишеней, упражнений и вооружений входят в стандартный комплект ПО тренажера и описаны (см. работы С. Ф. Егорова и др. в этом журнале за 2019–2023 г.) согласно ТТЗ, но пользователям дается возможность неограниченно пополнять все базы в рамках разработанных и реализованных математических моделей.

Предварительные операции выполнения сценария включают:

1. Выбор сценариев упражнений из списка (возможно выполнение одновременно двух разноплановых сценариев) и условий их проведения (время суток, подсветка ночью, «атмосфер-

ный» эффект, давление и температура воздуха, сила и порывы ветра, осадки и т. д.).

2. Задание информации о стрелках (ФИО, ИО, боезапас).

3. Пристрелка имитаторов (при необходимости).

4. Контроль правильности подготовки оружия к стрельбе (магазин, затвор-патрон, предохранитель).

Далее идут циклические операции, в том числе и анимации, которые требуют выполнения в реальном масштабе времени (не хуже 25 кадров/с).

И начинаются с одноразовых:

1. Считывание файла сценария упражнения, распределение мишеней по рабочим местам и ИО, расчет случайных настроек движения мишеней (времени появления, координат по фронту, дальности, порядок показа и т. п.).

2. Загрузка изображений объектов (мишеней, целей, местных предметов) и их предварительное масштабирование для ускорения анимации (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 2 за 2023 г.), определение времени упражнения.

3. Создание динамических программных списков неподвижных мишеней и местных предметов и подвижных мишеней для отработки текущей анимации (только появившихся по времени мишеней), а также списков спецэффектов.

А далее идет основной цикл анимации как раз с критическими требованиями по быстродействию (не менее 25 кадров/с):

1. Визуализация стрельбища с изменяемой мишенной обстановкой.

2. Решение «задачи встречи» при каждом выстреле ИО.

3. Реализация спецэффектов стрельбища, выстрела и мишеней.

4. Отображение оперативной информации о ходе упражнения на компьютере руководителя занятия.

Циклическая часть алгоритма заканчивается по времени упражнения, или при поражении всех мишеней, или по команде руководителя.

Завершающие операции выполнения упражнения:

1. Контроль правильности завершения стрельбы (магазин, затвор-патрон, предохранитель).

2. Анализ результатов стрельб с разбором ошибок.

3. Выставление оценок, сохранение протокола занятия в базе (с возможностью распечатать).

В циклической части обрабатываются не только синхронные процессы отрисовки списка визуальных объектов (что еще можно спрогнозировать по времени выполнения от их размера и количест-

ва), но и асинхронные – выстрелы ИО с обработкой информации от оборудования и задачей «встречи» со спецэффектами. Поэтому вводится система приоритетов для игнорирования низкоприоритетных операций, если цикл алгоритма анимации не укладывается в 1/25 с:

1. Самый высокий приоритет: отработка выстрела ИО («задача встречи»).

2. Высокий приоритет: визуализация движения мишеней.

3. Средний приоритет: визуализация активных местных предметов и некоторых спецэффектов (трассиры – следы трассирующих боеприпасов, в том числе сопла гранат, звуковая картина, ответный огонь, погода, подсветка, поведение целей, ветровая картина).

4. Низкий приоритет: информирование руководителя на экране ПЭВМ, остальные спецэффекты (фонтанчики земли от промахов пуль и разрывы гранат, ветросносимые дымовые завесы), т. е. при интенсивной стрельбе и большом количестве крупных мишеней могут отображаться не все разрывы, например, или «дергаться» дымовые завесы, а в случаях упражнений за пределами требований ТТЗ (более 32 одновременных целей) даже «дергаться» мишенная обстановка (что и наблюдалось на тестовых высокоинтенсивных упражнениях).

Таким образом, введенная система приоритетов циклических элементов алгоритма выполнения упражнения позволяет уложиться в требования по быстродействию, сохраняя оптимальную реалистичность анимации мишенной обстановки и эффективно прививать навыки стрельбы со спецэффектами.

Алгоритм анимации мишенной обстановки

Особенность алгоритма анимации состоит в отказе от перерисовки всего изображения стрельбища при обновлении визуальной информации на экране, так называемая спрайтовая анимация, где спрайт – изменяемый на экране объект, возможно с несколькими фазами движения [23, 24]. Происходит коррекция лишь локальных мест экрана и обязательно без мерцания (мерцание – когда мишень заметно для наблюдателя исчезает на старом месте и потом появляется на новом месте). Спрайтовый подход существенно повышает быстродействие алгоритма анимации, но усложняет структуры данных мишеней и требует учета возможного наложения изображений мишеней друг на друга (экранирования). Для реализации анимации без мерцания используется промежуточный буфер в ОЗУ ПЭВМ: при этом стирание спрайта на старом месте и отрисовка на новом

происходит одновременно и, значит, незаметно для наблюдателя.

Спрайтовая анимация с промежуточным буфером в ОЗУ (рис. 3) включает:

1. Копирование общего блока (старое место спрайта + новое место) из видеобуфера экрана в ОЗУ ПЭВМ (медленное копирование видеобуфер-ОЗУ).

2. Восстановление фона стрельбища на старом месте общего блока в ОЗУ (быстрое копирование ОЗУ-ОЗУ).

3. Взятие копии фона стрельбища из нового места общего блока в ОЗУ (быстрое копирование ОЗУ-ОЗУ).

4. Наложение спрайта с уменьшением и смешиванием граничных пикселей со стрельбищем на новое место общего блока в ОЗУ (быстрое копирование ОЗУ-ОЗУ) (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 2 за 2023 г.).

5. Вывод общего блока (старое место спрайта + новое место) из ОЗУ в видеобуфер экрана без мерцания (медленное копирование ОЗУ-видеобуфер).

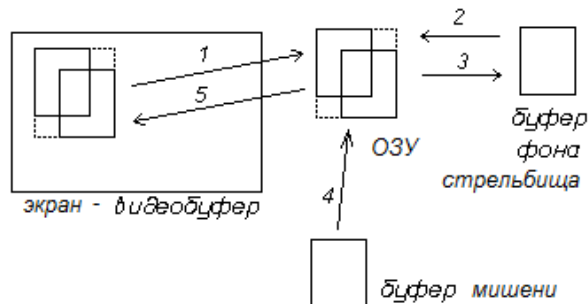


Рис. 3. Анимация через буфер в ОЗУ без мерцания

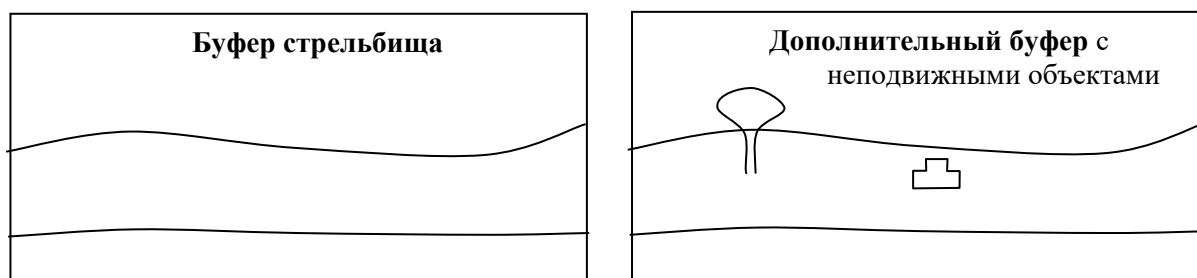
Fig. 3. Animation through a buffer in RAM without flickering

Такой алгоритм позволяет на 5-м этапе одновременно стереть спрайт на старом месте фоном стрельбища и нарисовать спрайт на новом единым построчным циклом и незаметно для наблюдателя, т. е. полностью исключить мерцание. При этом анимация идет от дальних мишеней к ближним (т. е. они предварительно сортируются по Z) после обновления всех координат движения.

Структура данных анимации включает буфер изображения стрельбища и после наложения на него неподвижных объектов (местных предметов и мишеней) дополнительный буфер (рис. 4). Для корректного вывода возможно накладывающихся друг на друга соседних на экране движущихся мишеней приходится сохранять сначала все выводимые общие блоки (рис. 3 вместо этапа 5) в промежуточные буфера списка «используемых областей» экрана (который

в начале цикла анимации очищается, рис. 4). И для каждого последующего общего блока проверять перекрытие координат со всеми блоками из списка и при необходимости объединять их координаты и изображения с заменой элемента списка (рис. 4, мишени 3 и 4). То есть перед 4-м этапом (рис. 3) идет проверка на пересечение текущего общего блока с областями из списка и при пересечении используется фон из этого списка для стирания старого текущего спрайта, а после этапа 5, на котором ничего не выводится, в список «используемых областей» добавляется новый элемент или, при пересечении, обновляется старый элемент с объединени-

ем координат областей и фона в промежуточном буфере списка «используемых областей». В конце цикла прорисовки выводятся все «использованные области» из списка, список сбрасывается. При этом не только происходит масштабирование и сглаживание (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 2 за 2023 г.), но и вычисление экранирования (по бинарной матрице видимости M), всеми другими близрасположенными объектами (как подвижными и неподвижными мишенями, так и местными предметами), а после и вычисление экранирования складками местности (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 1 за 2023 г.).



Список «используемых областей» с **промежуточными буферами** спрайтов в том числе после объединения перекрывающихся «мишени 3» и «мишени 4».

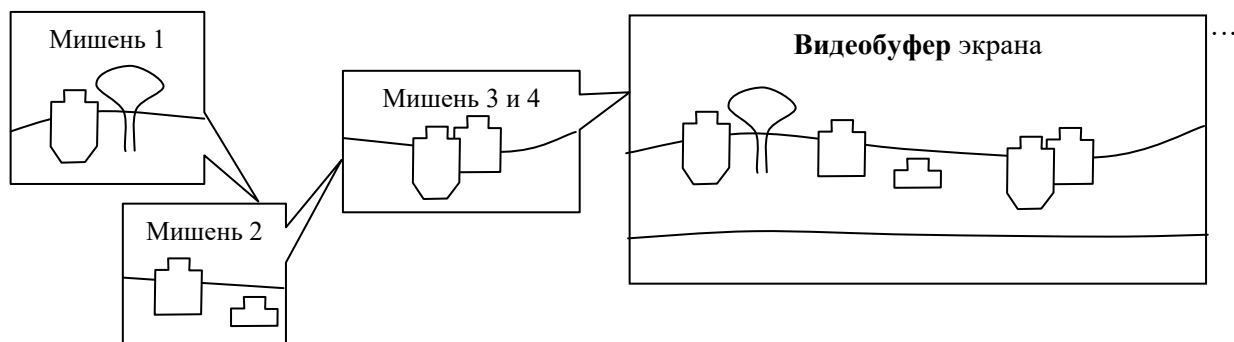


Рис. 4. Буферы алгоритма анимации

Fig. 4. Animation algorithm buffers

При этом неподвижные мишени и местные предметы, включенные в дополнительный буфер стрельбища, при перекрытии с движущимися мишенями восстанавливаются автоматически после экранирования. Если же неподвижная мишень поражена или должна исчезнуть на время по сценарию, то она «стирается» изображением исходного буфера стрельбища и вносится в список «используемых областей».

Реализация экранирования близлежащими объектами по центральной проекции (рис. 1, вид сверху и рис. 5) опирается на бинарную матрицу видимости M структуры данных мишени, первоначально полностью повторяющую отображаемые пиксели спрайта, на которую проецируются «тени» от объектов и сбрасывают $(1 \rightarrow 0)$ ее со-

держимое (рис. 5). $M_s = M_m \& \overline{M'_d}$ – для отображения мишени на экране используется M_s , полученная из исходной M_m -мишени после вычитания M'_d -экранирующего объекта (с проективными искажающими операциями, формула далее).

Итак, исходя из вышеизложенного, алгоритм анимации с шагом $t=1/25$ с (после инициализации списка «используемых областей» обновления неподвижных объектов по временам появления/исчезновения с коррекцией дополнительного буфера) состоит из следующих этапов для каждой подвижной мишени:

1. Цикл расчета новых координат всех подвижных мишеней X и Z в СКс ($X=X+V_x*t$, $Z=Z+V_z*t$) по ее скорости движения и расчет Y по

высоте рельефа стрельбища на новом месте, описанного билинейной интерполяцией прямоугольной матрицы высот с шагом 10 м ($Y=BL(X,Y,Z)$) (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 1 за 2023 г.), также проверка на времена появления/исчезновения мишени согласно сценарию.

2. При наличии активных выстрелов в очереди обработки выполняются очередные шаги «задачи встречи» (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 2 за 2022 г.) – полет боеприпаса по баллистической траектории за $1/25$ с и проверка точки попадания (ТП) в мишени, местные предметы или поверхность стрельбища.

3. Цикл инициализации матриц видимости всех объектов M по всем отображаемым пикселям спрайта в СКс.

$$M[i, j] = M[i, j] \& M_i \left[\text{round} \left(X - \frac{X_i \times Z}{Z_i} + \frac{i \times Z}{Z_i} \right), \text{round} \left(\frac{Y_i \times Z}{Z_i} - Y + \frac{j \times Z}{Z_i} \right) \right].$$

б. Подцикл проверки всех близлежащих рубежей рельефа стрельбища (с шагом 10 м) от текущей мишени на экранирование методом вычитания из матрицы видимости M ломаных линий верхних границ рельефа (при билинейной интерполяции границы ячейки рельефа являются прямыми линиями с «седлом» посередине) (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 1 за 2023 г.).

с. Определение дробных координат и размеров объекта на экране (видеобуфере) в СКэ после центральной проекции.

д. Циклическая проверка до «непересечения» каждый раз с начала списка «используемых областей» на пересечение габаритов в СКэ текущей мишени с габаритами всех мишеней из списка и объединение областей и промежуточных буферов (на объединенную область накладывается дополнительный буфер и поверх все пересекаемые) с заменой элемента (-ов) списка на новый, объединенный (рис. 4, мишени 3 и 4 например). Наложение же спрайта текущей мишени осуществляется с масштабированием (после однократного предмасштабирования) по дробным координатам на актуальный фон стрельбища из промежуточного буфера (после объединений со всеми пересекающимися буферами других объектов) с учетом матрицы видимости M и со сглаживанием границ спрайта (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале № 2 за 2023 г.), когда пропорционально смешиваются граничные пиксели мишени с пикселями фона стрельбища. (Точнее: I. Итерационно ищем все пересекающиеся области вывода в списке с текущей мишенью и объединяем границы. II. За-

4. Внутренний цикл шага алгоритма анимации по всем подвижным объектам:

а. Подцикл проверки всех близлежащих объектов ($Z_i < Z$) на экранирование текущей мишени и фиксация «тени» методом бинарного вычитания из ее матрицы видимости M всех ближних матриц видимости M_i после их масштабирования и смещения габаритов. Для чего сначала проверяется пересечение проекций габаритов мишеней по

$$\begin{cases} X_{\min} < \frac{X_{\max i} \times Z}{Z_i} & X_{\max} > \frac{X_{\min i} \times Z}{Z_i} \\ Y_{\min} < \frac{Y_{\max i} \times Z}{Z_i} & Y_{\max} > \frac{Y_{\min i} \times Z}{Z_i} \end{cases}$$

и при выполнении корректируется матрица видимости M (создается «тень» проекции) по

носим в объединенное окно соответствующее место из дополнительного буфера. III. Копируем на объединенное место все найденные в списке окна. IV. Накладываем на объединенное место текущую мишень с масштабированием и смешиванием с учетом матрицы видимости. V. Удаляем из списка все пересекаемые области и вставляем общую объединенную.)

5. После заполнения списка «используемых областей» всеми объектами сцены осуществляется простое копирование промежуточных буферов на видеобуфер проекционного экрана (рис. 4).

б. Запускается отработка спецэффектов с контролем времени до конца цикл анимации (не более $1/25 - t_{\text{анимации}}$ с) и с учетом приоритетов, т. е. низкоприоритетные спецэффекты могут в данном цикле анимации игнорироваться (подробнее в следующих статьях цикла).

Таким образом, при выводе изображений объектов на экран в рамках единого алгоритма спрайтовой анимации одновременно производится отсечение невидимых их частей (экранирование), масштабирование до угловых размеров, соответствующих моделируемому расстоянию, и сглаживание границ изображения спрайта на стрельбище с использованием буферов в ОЗУ, что гарантирует отсутствие мерцания и высокую реалистичность. Требования ТТЗ выполнены.

Исследование

позиционирования мишеней

Моделируемая мишень по алгоритму анимации перемещается в пространстве стрельбища визуально непрерывно. Устройства отображения

(в данном случае проекторы экрана) дискретны, следовательно, при выводе изображения мишени на экран возникает погрешность Δ визуального позиционирования ее горизонтального центра: максимум $\Delta = \pm 0,5$ пикселя с физическим размером $2,15 \times 2,15$ мм (или $\pm 0,67'$ угловые минуты при расстоянии до экрана 5 м). При рассмотрении крупноразмерных мишеней это не оказывает существенного влияния, но при отображении целей с малыми угловыми размерами (а на 600 м ростовая мишень шириной 50 см отображается как $\approx 2,18$ пикселя) подобная погрешность приводит к искажению размеров и пропорций целей, прерывистости их движения по экрану (дерганью) и, главное, затрудняет точность визуального прицеливания обучаемым.

Если рассмотреть мишень размером в один пиксель, движущуюся с постоянной скоростью



Рис. 6. 1-пиксельная цель при $n=3$ яркостях и ошибки ее позиционирования

Fig. 6. 1-pixel target with $n=3$ brightness and its positioning errors

Увеличение же числа используемых полутонов ведет к еще большему визуальному уменьшению шага квантования, а значит, и погрешности:

$h' = \frac{h}{n-1}$, где h' – визуальный шаг квантования (определяющий ошибку фиксации человеком центра мишени: $\Delta_{\max} = \pm 0,5h'$), n – общее число различных полутонов (включая условный черный цвет мишени и белый цвета фона), максимум $n=256$ (для видео-режима *RGB TrueColor*). Тогда при использовании полутонового сглаживания ошибка визуального позиционирования при равномерном движении цели

будет распределена по закону $R_{XY} = \left(0, \frac{h'^2}{12}\right)$

для пропорциональных осей X и Y . Уже при использовании $n=16$ градаций серого визуальный шаг квантования h' уменьшается до 0,143 мм, а при $n=256$ до пренебрежимых 0,00843 мм [25]. Но в реальности разница между темно-зеленой мишенью и светло-зеленым лесом фона не пре-

вдоль оси X по уравнению $X=V_x t$, и использовать для ее отображения только два уровня яркости (черный и белый), то ошибка квантования в данном случае распределена по равномерному закону $R = (0, h^2/12)$, где $h=2,15$ мм – горизонтальный размер пикселя.

При использовании технологии смешивания изображений (см. работу С. Ф. Егорова в данном журнале № 2 за 2023 г.), когда при отображении мишени вводится полутоновая аппроксимация яркости ее границ по дробным координатам наложения на фон стрельбища, добавляется, например, 3-й «серый» цвет. При этом визуально уменьшается шаг квантования, а значит, и ошибка позиционирования центра мишени (за центр мишени принимается середина ее визуальной оптической плотности, рис. 6).

вышает 64 градаций и погрешность будет все же не менее $\Delta_{\min} > \pm 0,017$ мм ($h'_{64} = 0,034$ мм), что тоже незначительно.

Погрешность визуального позиционирования мишеней, внося ошибку в прицеливание, практически не вносит отклонения в моделирование баллистической траектории. Наименьшей величиной рассеиванием боеприпасов обладает СВД: срединные отклонения на дистанции 100 метров составляет $B_B = B_B = 18$ мм (B_B – верхнее и B_B – боковое) (см. работу С. Ф. Егорова и др. в данном журнале № 2 за 2021 г.), из соображений подобия величина отклонений при расстоянии до проекционного экрана 5 метров составит $B'_B = B'_B = 18 : (100 : 5) = 0,9$ мм. Тогда с.к.о. ошибки позиционирования составит для 64 гра-

даций $\sigma_{\Delta} = \frac{h'}{2\sqrt{3}} \approx 0,01$ мм, а с.к.о. σ_B горизонтального рассеивания ТП для СВД составит

$$\sigma_B = \frac{B'_B}{0,6745} = 1,33 \text{ мм.}$$

Таким образом, сравнивая с.к.о. σ_A с σ_B , можно заключить, что ошибка визуального позиционирования мишени благодаря использованию алгоритма анимации с масштабированием мишеней и со сглаживанием их границ становится пренебрежимо мала и ее можно не учитывать при определении точки попадания.

Выводы

Анализ математического обеспечения анимации мишенной обстановки без мерцания и с экранированием показал:

1. Для реалистичности анимации требуется частота не менее 25 кадров/с, поэтому введена система приоритетов отображения спецэффектов боя (например, у мишеней выше, чем у разрывов).

2. Использование буфера в ОЗУ при анимации избавило от мерцания при обновлении движущихся объектов, а реализация экранирования мишеней близлежащими объектами через проекцию «тени» на матрицу видимости упростило и ускорило алгоритм спрайтовой анимации, что позволило выполнить требования ТТЗ по реалистичности и быстройдействию.

3. Исследование алгоритма анимации на обеспечение точности визуального прицеливания в изображении уменьшенных мишеней благодаря сглаживанию ее границ при выводе мишеней на изображение стрельбища со смешиванием цветов показало соответствие требованиям ТТЗ.

Таким образом, показана актуальность дальнейшего исследования и использования электронных стрелковых тренажеров на базе разработанных и испытанных математических моделей и алгоритмов анимации мишенной обстановки без мерцания и с экранированием близлежащими объектами, особенно благодаря высокой гибкости программного обеспечения, позволяющего в реальном времени визуализировать реалистичную мишенную обстановку.

Библиографические ссылки

1. Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E. Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting. // *Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10057. 2019. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12.

2. Lábr M., Hagara L. Using open source on multi-parametric measuring system of shooting // *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.

3. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training // *SENSORS*. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 10.3390/s19030451.

4. de Armas C., Tori R., Netto A. V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review // *Multimed Tools Appl*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

5. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system // *Defence Technology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>.

6. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek, M., Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator - tests in a virtual reality application // *PHOTONICS LETTERS OF POLAND*. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.

7. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force // *POLICE QUARTERLY*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332. DOI: 10.1177/1098611119896653.

8. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements // *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS*. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.

9. Корнилов И. Г., Афанасьева Н. Ю., Веркиенко Ю. В. Обратная модель системы «проектор – экран – опико-электронный преобразователь» стрелкового тренажера // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2007. № 1. С. 63–65.

10. Корнилов И. Г. Измерительно-вычислительная система определения точки попадания в стрелковом тренажере коллективного боя // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2012. № 2. С. 110–113.

11. Тренажер опико-электронный для стрелкового оружия / Ю. В. Веркиенко, В. С. Казаков, В. В. Коробейников, С. Ф. Егоров, С. В. Казаков // *Вестник академии военных наук*. 2008, № 4. С. 84–89.

12. Егоров С. Ф., Вдовин А. Ю. Исследование необходимости использования переменного значения баллистического коэффициента при моделировании траектории пули в стрелковом тренажере // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2023. Т. 23, № 2. С. 253–263. DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263.

13. Прекина Т. А., Гвоздев А. К., Мудрик И. А. Освоение огневой подготовки курсантами МВД в современном мире с применением инновационных технологий // *Эпоха науки*. 2020. № 23. С. 79–82.

14. Таков А. З., Курманова М. К. Применение современных технологий в обучении стрельбе из боевого оружия // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 11-2. С. 412–416. DOI: 10.17513/snt.38398.

15. Никифоров П. В., Музафин Р. П. Использование стрелковых тренажеров в подготовке сотрудников ОВД // *Евразийский юридический журнал*. 2020. № 3 (142). С. 275–276.

16. Ермоленко С. А., Клименко С. С., Курза А. В. Особенности использования стрелкового тренажера

СКАТТ на занятиях по огневой подготовке // Эпоха науки. 2020. № 22. С. 47–49.

17. Жемчужников А. В. Современное состояние и перспективы технического развития электронных стрелковых комплексов // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. 2021. № 4 (4). С. 116–119.

18. Коряковцев Д. А., Пleshков А. В., Гурьев В. И. Использование стрелковых тренажеров на занятиях по огневой подготовке в образовательных организациях МВД России // Эпоха науки. 2021. № 25. С. 96–98. DOI: 10.24412/2409-3203-2021-25-96-98.

19. Першин А. Т., Большакова В. А., Гусевская К. С. Использование стрелковых тренажеров «Рубин» в профессиональной подготовке сотрудников полиции // Символ науки : международный научный журнал. 2021. № 4. С. 101–103.

20. Юрков М. Н. Применение современных стрелковых тренажеров при проведении занятий по огневой подготовке курсантов образовательных учреждений ФСИН России // Молодой ученый. 2021. № 5 (347). С. 374–375.

21. Огрыза А. В., Ульрих С. А., Таран А. Н. Практическая значимость использования электронных тренажеров на занятиях по огневой подготовке // Евразийский юридический журнал. 2022. № 1 (164). С. 419–420.

22. Иньшин Ю. Ю., Липаткин А. В. Стрелять хорошо и много инновационные подходы в обучении курсантов стрельбе с использованием боевого лазерного интерактивного высокоточного комплекса «БЛИК-ВТ» // Вестник военного образования. 2022. № 3 (36). С. 28–33.

23. Смирнов А. А. Разработка методики и алгоритмов имитации местности и мишенной обстановки в стрелковых тренажерах : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2001. 148 с.

24. Смирнов А. А., Егоров С. Ф. Повышение быстроедействия при отображении целей в компьютерных стрелковых тренажерах // Информационные технологии в инновационных проектах : труды международной научно-технической конференции (г. Ижевск, 19–20 апреля 2000 г.). Ижевск : Изд-во Механического завода, 2000. С. 224–225.

25. Смирнов А. А. Разработка методики и алгоритмов имитации местности и мишенной обстановки в стрелковых тренажерах : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2001. 148 с.

References

1. Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E. Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting. Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science, vol 10057. 2019. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12.

2. Lábr M., Hagara L. Using open source on multiparametric measuring system of shooting. ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.

3. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training. SENSORS. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 10.3390/s19030451.

4. de Armas C., Tori R., Netto A. V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review. Multimed Tools Appl. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

5. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survilaita A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system. Defence Technology. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>.

6. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator - tests in a virtual reality application. PHOTONICS LETTERS OF POLAND. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.

7. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force. POLICE QUARTERLY. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332 (1098611119896653). DOI: 10.1177/1098611119896653.

8. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements. METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.

9. Kornilov I.G., Afanas'eva N.Yu., Verkievko Yu.V. Obratnaya model' sistemy «proektor – ekran – optiko-elektronnyi preobrazovatel'» strelkovogo trenazhera [Reverse model of the system "projector - screen - optoelectronic converter" shooting simulator]. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2007, no. 1, pp. 63-65 (in Russ.).

10. Kornilov I.G. Izmeritel'no-vychislitel'naya sistema opredeleniya tochki popadaniya v strelko-vom trenazhere kollektivnogo boya [Measuring and computational system for determining the point of hit in the collective combat shooter]. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2012, no. 2, pp. 110-113 (in Russ.).

11. Verkievko Yu.V., Kazakov V.S., Korobeynikov V.V., Egorov S.F., Kazakov S.V. Trenazher optiko-elektronnyi dlya strelkovogo oruzhiya [The exercise machine optical-electronic for small arms]. Vestnik akademii voennykh nauk, 2008, no. 4, pp. 84-89 (in Russ.).

12. Egorov S.F., Vdovin A.Yu. Issledovanie neobkhodimosti ispol'zovaniya peremennogo znacheniya ballisticheskogo koeffitsienta pri modelirovanii traektorii puli v strelkovom trenazhere [Study of the need to use a variable value of the ballistic coefficient when modeling the trajectory of a bullet in a shooting simulator]. Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika. 2023, vol. 23, no. 2, pp. 253-263 (in Russ.). DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263.

13. Prekina T.A., Gvozdev A.K., Mudrik I.A. Osvoenie ognevoi podgotovki kursantami MVD v sovremennom mire s primeneniem innovatsionnykh tekhnologii [Development of fire training by students of the MIAffairs in the modern world using innovative tech-

nologies]. *Epokha nauki*, 2020, no. 23, pp. 79-82 (in Russ.).

14. Takov A.Z., Kurmanova M.K. *Primenenie sovremennykh tekhnologii v obuchenii strel'be iz boevogo oruzhiya* [Application of modern technologies in training in firing from combat weapons]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2020, no. 11-2, pp. 412-416 (in Russ.). DOI: 10.17513/snt.38398.

15. Nikiforov P.V., Muzafin R.R. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov v podgotovke sotrudnikov OVD* [Use of shooting simulators in training of IAO]. *Evrasiiskii yuridicheskii zhurnal*, 2020, no. 3 (142), pp. 275-276 (in Russ.).

16. Ermolenko S.A., Klimenko S.S., Kirza A.V. *Osobennosti ispol'zovaniya strelkovogo trenazhera SKATT na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke* [Peculiarities of SCATT shooting simulator use in fire training classes]. *Epokha nauki*, 2020, no. 22, pp. 47-49 (in Russ.).

17. Zhemchuzhnikov A.V. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya elektronnykh strelkovykh kompleksov* [The current state and prospects for the technical development of electronic rifle complexes]. *Al'manakh Permskogo voennogo instituta voisk natsional'noi gvardii*. 2021, no. 4 (4), pp. 116-119 (in Russ.).

18. Koryakovtsev D.A., Pleshkov A.V., Gurylev V.I. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke v obrazovatel'nykh organizatsiyakh MVD Rossii* [The use of shooting simulators in fire training classes in educational organizations of the MIA of Russia]. *Epokha nauki*. 2021, no. 25, pp. 96-98 (in Russ.). DOI: 10.24412/2409-3203-2021-25-96-98.

19. Pershin A.T., Bol'shakova V.A., Gusevskaya K.S. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov «Rubin» v professional'noi podgotovke sotrudnikov politsii* [The use of «Rubin» rifle simulators in the professional training of police officers]. *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal*. 2021, no. № 4, pp. 101-103 (in Russ.).

20. Yurkov M.N. *Primenenie sovremennykh strelkovykh trenazherov pri provedenii zanyatii po ognevoi podgotovke kursantov obrazovatel'nykh uchrezhdenii*

FSIN Rossii [The use of modern shooting simulators when conducting fire training classes for cadets of educational institutions of the FPS of Russia]. *Molodoi uchenyi*. 2021, no. № 5 (347), pp. 374-375 (in Russ.).

21. Ogryza A.V., Ul'rikh S.A., Taran A.N. *Prakticheskaya znachimost' ispol'zovaniya elek-tronnykh trenazherov na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke* [Practical significance of using electronic simulators in fire training classes]. *Evrasiiskii yuridicheskii zhurnal*. 2022, no. № 1 (164). pp. 419-420 (in Russ.).

22. In'shin Yu.Yu., Lipatkin A.V. *Strelyat' khorosho i mnogo innovatsionnye podkhody v obuchenii kursantov strel'be s ispol'zovaniem boevogo lazernogo interaktivnogo vy-sokotochnogo kompleksa «BLIK-VT»* [Shoot well and many innovative approaches in training cadets in shooting using the combat laser interactive high-precision complex "BLIK-VT"]. *Vestnik voennogo obrazovaniya*. 2022, no. 3 (36). pp. 28-33 (in Russ.).

23. Smirnov A.A. *Razrabotka metodiki i algoritmov imitatsii mestnosti i mishennoi obstanovki v strelkovykh trenazherakh* [Development of a technique and algorithms of imitation of the area and target situation in shooting exercise machines]: PhD thesis. Izhevsk, 2001, 148 p. (in Russ.).

24. Smirnov A.A., Egorov S.F. *Povyshenie bystrodeistviya pri otobrazhenii tselei v komp'yuternykh strelkovykh trenazherakh* [Speed up when displaying targets in computer shooter simulators] *Informatsionnye tekhnologii v innovatsionnykh proektakh: Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (g. Izhevsk, 19-20 aprelya 2000g.)*. [Information technologies in innovative projects: Proceedings of the international scientific and technical conference (Izhevsk, April 19-20, 2000)]. Izhevsk, 2000, pp. 224-225 (in Russ.).

Smirnov A.A. *Razrabotka metodiki i algoritmov imitatsii mestnosti i mishennoi obstanovki v strelkovykh trenazherakh* [Development of a technique and algorithms of imitation of the area and target situation in shooting exercise machines]: PhD thesis. Izhevsk, 2001, 148 p. (in Russ.).

Shooting Simulator «Inhibitor»: Mathematical Support of Target Layout Animation

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor; Senior Scientific Associate, Udmurt Federal Research Center UB RAS

Amathematical support of target layout animation on the image of the shooting range with shielding by nearby objects and without flickering for the optical-electronic shooting simulator "Inhibitor" developed at Institute of mechanics UdmFRC UB RAS and at Computer facilities department of Kalashnikov ISTU jointly with JSC «Kalashnikov» Concern» is described.

The tactical and technical task for the implementation of realistic target layout animation is given: support for all exercises from the Shooting Course with emerging-disappearing and moving targets on the surface of the shooting range with local objects that shield them, as well as folds of the area and other targets. Movements should be realistic in speed and angular dimensions of targets, smooth without jerking and correspond to the exercise scenario from the Firing Course: targets up to 2 m/s, armored vehicles up to 4 m/s at an angle of 15-20° from maximum ranges to minimum ones. The animation frequency should be maintained at least 25 frames/s, with the priority of the target layout (at least up to 32 at the same time) over special effects and local objects. The conducted studies of the animated target

positioning accuracy with strong reduction in their size at longer ranges to ensure the realism of aiming at such images confirmed compliance with the requirements of TDP (significantly less than 0.3 thousandth range or 1.5 mm).

Based on the prospects for further research and development of electronic shooting simulators and thanks to the improvement of computing tools and the development of software graphic libraries, it is necessary to expand the functional capabilities of simulators and reduce the cost, so as to increase competitiveness, for example, due to the realism of the animation of the target environment.

Keywords: shooting simulator, coordinate system, mathematical model, sprite animation, object shielding.

Получено: 14.06.23

Образец цитирования

Егоров С. Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение анимации мишенной обстановки // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 70–81. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-70-81.

For Citation

Egorov S.F. [Shooting simulator «Inhibitor»: mathematical support animations of the target setting]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 70-81. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-70-81.