

УДК 004.928+004.421

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-81-92

## Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение мишенной обстановки

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

*Описывается математическое обеспечение мишенной обстановки с предмасштабированием при хранении и смешиванием границ изображений мишеней при ее отображении на стрельбище тактического тренажера оптико-электронного для 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 мишенной обстановки: поддержка всех мишеней из Курса стрельб и реалистичных целей, угловые размеры объектов на экране должны соответствовать реальным дальностям до них, а быстродействие алгоритмов визуализации позволять одновременно отображать не менее 32 мишеней с частотой не менее 25 кадров/с. При разработке математического обеспечения выбран BMP-формат хранения изображений TrueColor с масштабом 1 пиксел=1 см<sup>2</sup>, сделан упор на предмасштабирование мишеней для ускорения дальнейшей обработки и обязательное смешивание цветов границ «объект-фон» при отображении для поддержки дробных координат с долями пикселя сильно уменьшенных мишеней на экране (так, грудная мишень шириной 50 см на расстоянии 100 м должна быть в 12,8 точки шириной, а уже на расстоянии 600 м только 2,13 точки). Проведенные исследования быстродействия математического обеспечения формирования изображений мишенной обстановки подтвердили соответствие требованиям ТТЗ и рекомендовали коэффициент предмасштабирования 0,5 (1:2) для оптимального отношения «качество-быстродействие».*

*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 повышения реалистичности отображения мишенной обстановки.*

**Ключевые слова:** стрелковый тренажер, система координат, математическая модель, цель, масштабирование изображений, антиалиазинг (смешивание границ).

### 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, 10]. Нарботки в настоящее время используются для следующего семейства тренажеров [11].

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 [12–22]. Кроме этого, тренажеры отличаются безопасностью тренировок и быстрой окупаемостью по сравнению с войсковыми стрельбищами и боевыми тирами.

Целью статьи является описание и исследование алгоритмов предмасштабирования изображений мишеней и смешивания цветов пикселей на границе «мишень-фон» при реалистичном отображении на рельефе стрельбища для тактического оптико-электронного тренажера стрелкового оружия «Ингибитор».

### Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ [23] к моделированию мишенной обстановки включают:

1. Отображение имитированной мишенной обстановки из неподвижных, появляющихся и движущихся целей (мишени № 4, 5а, 6, 7, 3, 8а, 9, 10, 10а, 11, 12, 12а, 12б согласно Курсу стрельб). Размещение, появление и перемещение мишеней в соответствии с упражнениями Курса стрельб и по желанию руководителя занятий до 10 мишеней на каждого стреляющего с одновременным показом 4 целей, при этом должна учитываться топография изображаемой местности...

2. Имитированная местность с местными предметами и мишени должны соответствовать в масштабе реальному изображению, времени года и суток... Отображение целей с достаточно большой реальностью позволит прививать навыки в своевременном их обнаружении и распознавании, а также в проведении оценки результатов стрельбы.

Фактически требования ТТЗ сводятся к естественной реалистичности мишенной обстановки:

1. Видимые размеры отображаемых мишеней 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.

Таким образом, основными задачами создания математического обеспечения (МО) мишенной обстановки является разработка и исследование алгоритма смешивания границ изображе-

ний «мишень-стрельбище» (так называемое сглаживание) для иллюзии плавности движений при отображении мишеней естественного малого углового размера и исследование алгоритма предмасштабирования для ускорения операций отображения мишеней на разных дальностях.

### Математическая модель мишенной обстановки

Для отображения плоских 2D-целей на экране необходимо иметь их исходное описание, которым может служить оцифрованное изображение в виде прямоугольного двумерного массива, элементы которого задают требуемый цвет в данной точке, а хранятся в файлах формата BMP (24 бита на цвет в системе RGB TrueColor). Масштаб изображений выбран  $1 \text{ pixel} = 1 \text{ см}^2$  (так описаны мишени в Курсе стрельб), что дает дальность мишени без уменьшения при центральной проекции на экран с  $L_0 = 5 \text{ м}$  от наблюдателя и размере пикселя на экране  $2,15 \times 2,15 \text{ мм}$  (см. работу Егорова С. Ф. и др. в этом журнале за 2020 г.) в  $D_{1:1} = 10:2,15 \times 5 = 23,256 \text{ м} \approx 25 \text{ м}$ , а «прозрачными», т. е. неотображаемыми, считаются значения пикселей мишени  $(R > 250) \& (G > 250) \& (B > 250)$ . При выводе изменяющейся мишенной обстановки из системы координат стрельбища  $XYZ$  в систему координат проекционного экрана  $X_3Y_3$  (рис. 1) производятся преобразования этих изображений (уменьшение мишеней и наложение на стрельбище), где скорость определяется лишь числом элементов в исходном и результирующем изображениях и сложностью самого преобразования и является ключевой характеристикой для реалистичности быстрого действия при перемещении мишенной обстановки.

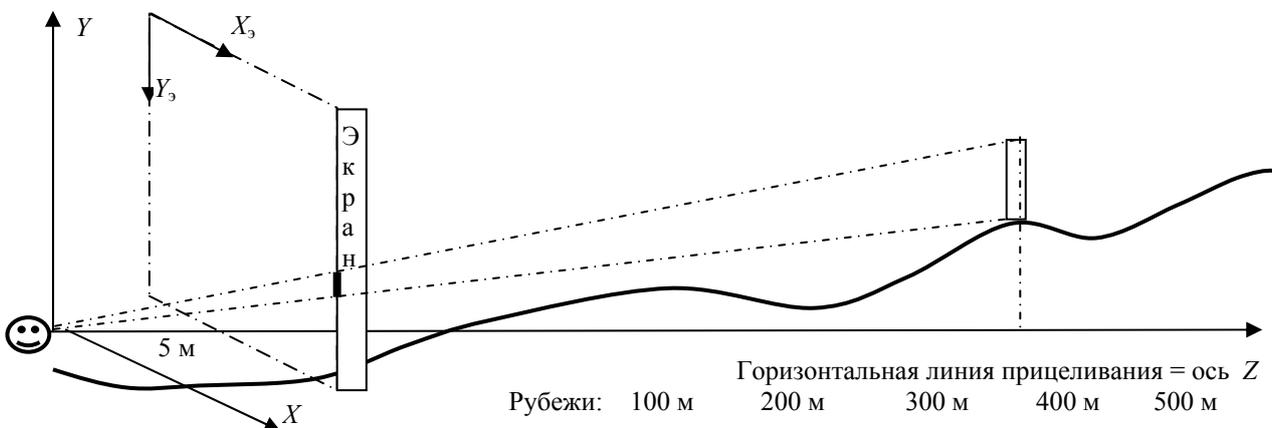


Рис. 1. Центральная проекция мишенной обстановки

Fig. 1. Projection of the target environment on the screen

Мишени создаются во внешнем редакторе согласно приложению Курса стрельб (формой, размером и цветом), а цели на основе реальных фотографий с фазами движения для реалистич-

ности на «прозрачном фоне» и выравненными в BMP-файле изображения по центру нижней границы (рис. 2).



Рис. 2. Примеры мишеней и целей

Fig. 2. Examples of marks and targets

Необходимость соблюдения видимой плавности движения мишенной обстановки (в том числе и изменение угловых размеров от дальности) приводит к тому, что целочисленные координаты позиций и размеров объектов в пикселях на экране после неизбежного масштабирования не гарантируют реалистичности. Так, на дальности 400 м при смещении изображения мишени на 1 точку она должна переместиться на стрельбище сразу на  $\approx 17$  см, т. е. не получается с достаточной точностью передать и размер мишени, и ее перемещение. С увеличением дальности, когда объекты с малыми угловыми размерами (единицы пикселей) на малых скоростях будут дергаться и резко изменять свою видимую форму, погрешность изображений растет, если округлять их размеры с точностью до пикселя (рис. 3, в, шаги 2, 4). Так, стандартная мишень, грудная или ростовая, имеет ширину 50 см, на расстоянии 100 м ее угловой горизонтальный размер составляет  $0,2865^\circ$ , что в целых пикселях экрана будет составлять 13 (а точно  $\approx 12,8$  точки,  $+1,6$  % погрешность). На расстоянии 600 м это

будет уже только 2 точки (а точно  $\approx 2,13$ ,  $-6$  % погрешность).

Необходимо обеспечить наложение развернутых в растр уменьшенных изображений объектов на растр устройства отображения – проекционный экран – когда границы пикселей объектов могут не совпадать с границами пикселей фона (рис. 3, б, шаги 1, 3). Фактически этого добиться нельзя, т. к. пиксель – минимальный элемент изображения, которому можно независимо задать яркость (цвет), но можно создать у наблюдателя визуальную иллюзию эффекта дробного пикселя («полупикселя», субпикселя), особенно в динамике. Для этого необходимо при выводе каждого пикселя мишени, если он не полностью перекрывает пиксель фона (стрельбища), что бывает на границах изображения, учитывать и цвета пикселей фона, т. е. проводить смешивание цвета объекта и фона пропорционально площади наложения на результирующий пиксель, что и позволяет устранить видимую грубую ступенчатость на границе изображения «объект-фон» (так называемое сглаживание, рис. 3, г по сравнению с рис. 3, в).

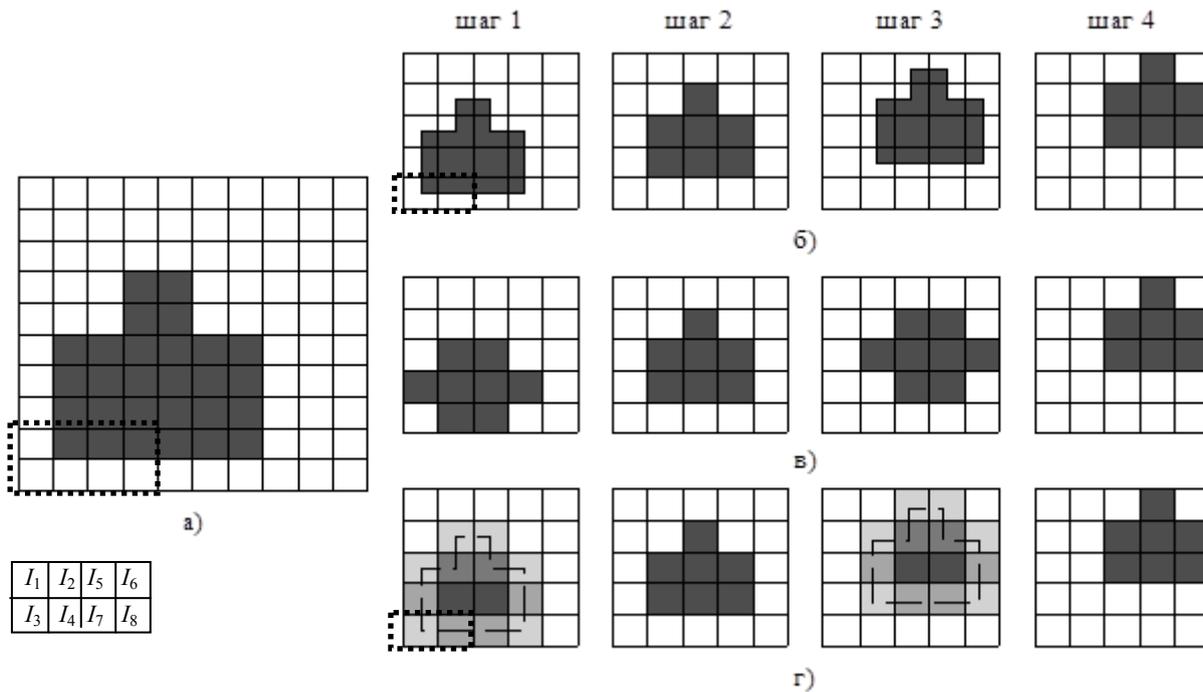


Рис. 3. Перемещение объекта по фону: а – исходное до масштабирования 1:2; б – «идеальное» перемещение по шагам; в – традиционный подход целочисленной аппроксимации; г – смешивание яркости границ «объект-фон» для визуализации «полпикселя»

Fig. 3. Moving the object along the background: а) original before scaling 1:2; б) "ideal" movement along steps; в) traditional integer approximation approach; г) mixing brightness of the object-background boundaries to render the "half pixel"

Субпиксельный алгоритм (технология antialiasing) масштабирования и наложения изображений, интерпретирующий пиксели не как безразмерные точки, а как элементы изображения с определенной площадью и дробными координатами, определяет яркость  $I'$  для каждого пикселя результирующего изображения, соответствующего общему фрагменту «объект+фон», по формуле:

$$I' = \frac{\sum_{j=1}^n I_j S_j}{K^2} S_p + I_f (1 - S_p), \quad (1)$$

где  $n$  – общее число целых пикселей объекта, участвующих в определении цвета одного результирующего пикселя  $I'$  при уменьшении;  $I_j$  – яркость пикселей изображения объекта;  $S_j$  – площадь части пикселя изображения объекта, проецируемая на пиксель фона с яркостью  $I_f$ ;  $K^2$  – площадь дробных пикселей объекта на один пиксель фона (фактически, это произведение коэффициентов уменьшения исходного изображения по горизонтали  $K_{\Gamma}$  и вертикали  $K_{\text{в}}$ , которые считаются равными  $K_{\Gamma} = K_{\text{в}} = K$ , и  $K > 1$ );  $S_p$  – площадь части пикселя фона, перекрываемая пикселями накладываемого изображения объекта (чаще  $S_p = 1$ , но на границах «объект-фон»  $S_p < 1$ ).

Сравнение реализованного подхода смешивания яркости граничных пикселей «объект-фон» пропорционально от доли их площади и традиционного округления цвета пикселей приведены на рис. 3, в и г. Так, левый нижний прямоугольник из 8 пикселей (рис. 3, а) при масштабировании 1:2 и смешивании с фоном (рис. 3, г) шаг 1 для полутонного объекта ( $I_2 = I_5 = I_6 = 77$  – серый цвет) на белом фоне ( $I_1 = I_3 = I_4 = I_7 = I_8 = 250$ ) дает границу по (1) с  $n = 4$ ,  $K^2 = 2^2 = 4$ ,  $S_j = 1$  левый и правый смешанные пиксели с яркостью  $I_n = 206.75 \approx 207$  ( $\Delta I_n = \pm 0.25$  – погрешность) и  $I_n = 163.5 \approx 164$  ( $\Delta I_n = \pm 0.5$  – погрешность).

Таким образом, чтобы обеспечить плавность перемещения изображений объектов и высокую визуальную точность их позиционирования (по центру яркости), необходимо накладывать их уменьшенные до расчетных угловых размеров исходные изображения по произвольным координатам. То есть и коэффициент масштабирования, и координаты наложения должны быть дробными числами и границы пикселей исходного и результирующего изображений могут не совпадать, что позволит использовать шаг смещения движущегося объекта по одной из координат меньше размера пикселя и, соответственно, точно передавать

плавное ее изменение (так, при 25 кадрах/с и перемещении мишени на расстоянии 400 м со скоростью 2 м/с получается шаг 8 см или при отображении 0,465 пикселя). Кроме того, имеет смысл объединить масштабирование и вывод изображения по дробной координате со смешиванием граничных цветов в единый алгоритм с контролем площади каждого пикселя исходного изображения, попадающего на рассчитываемый пиксель результирующего изображения, что позволяет и сглаживать контуры объекта, и точно передавать детали изображения внутри. Эксперименты показали [24], что форма мишени воспринимается человеком как реалистичная в широком диапазоне дальностей (а значит, и коэффициентов масштабирования) даже при уменьшении изображения до единиц пикселей.

### Технология предмасштабирования

В реальных сценариях упражнений мишени перемещаются на типичной дальности 600–100 м, т. е. всегда требуется их масштабирование в сторону уменьшения до естественных угловых размеров с коэффициентом  $0 < k \leq 1$ , что уменьшает площадь  $S$  мишени до  $k^2 S$ . На дальних расстояниях требуется постоянное сильное уменьшение движущихся целей, что времязатратно, особенно для больших мишеней (так, танк – мишень № 12, рис. 2 – это  $342 \times 237 = 81054$  точек). При большом количестве целей на экране, а ТТЗ предполагает одновременно до 4 мишеней на каждое рабочее место из 8, может даже не хватить времени на формирование одного кадра изображения (а это максимум 1/25 с), что резко ухудшает реалистичность отображения изменяемой мишенной обстановки (возникают «дерганья» целей).

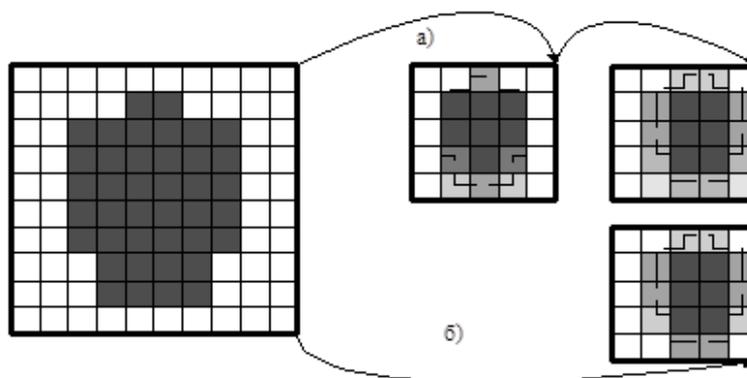


Рис. 4. Качество масштабирования с  $D1 = 0$ : а – с предмасштабированием 1:2; б – без

Fig. 4. Scaling Quality with  $D1 = 0$ : а) with 1:2 pre-scaling б) without

Предварительное однократное предмасштабирование изображений мишеней должно априори ускорить отображение (т. е. дальнейшее точное масштабирование со смешиванием границ). Например, выполнено предмасштабирование для дальности мишени  $D0$ , а окончательное масштабирование – по расстоянию  $(D0 + D1)$ , когда  $D1$  может изменяться при перемещении мишени, а  $D0$  постоянно и не может быть больше минимального расстояния до мишени по сценарию упражнения (что определяется заранее и гарантирует не увеличение мишени). Тогда при изменении отношения  $D0/D1$  будет изменяться баланс «быстродействие / качество» отображения. При уменьшении расстояния  $D1$  качество результирующего изображения на экране будет ухудшаться, т. к. масштабирование с коэффициентом, приближающимся к 1, приводит к излишнему размытию границ мишени, и при  $D1 = 0$  и  $k = 1$  эффект от использования алгоритма предмасштабирования исчезнет

совсем – фактически сильнее «размазывается» промежуточное изображение без масштабирования, лишь слегка сглаживая прерывистость движения изображения мишени (рис. 4, смещение вправо на полпикселя, в случае рис. 4, а видно излишнее размытие низа мишени). Коэффициенты  $K$  в наиболее дальней и самой ближней точках траектории движения объекта отличаются незначительно (для типичной мишени упражнений Курса стрельб при перемещении на дальностях 400–300 м это в 1,33 раза, даже танки на 500–200 м только в 2,5 раза), поэтому нет необходимости заранее готовить несколько фиксированных уменьшенных изображений, учитывая снижение качества при малом дальнейшем уменьшении и ограничиться одним коэффициентом предмасштабирования.

### Исследование быстродействия алгоритма

Основное требование к мишенной обстановке – высокое быстродействие визуализации мишеней (кадр за 1/25 с для 32 мишеней минимум,

а при поддержке еще и спецэффектов выстрела все 128, что будет рассмотрено в следующих статьях) с сохранением высокой реалистичности без искажений – обеспечивается оптимальным коэффициентом предмасштабирования мишеней и объединением масштабирования со смешиванием границ изображений в едином высокоскоростном алгоритме.

Исследования быстродействия проводились на тестовой программе с усреднением значений по 50 замерам, чтобы снизить влияние случайных факторов, в том числе и операционной

системы Windows [25, 26]. Коэффициент уменьшения мишеней  $K$  всегда больше единицы ( $K = 1/k$ ) и равен отношению линейных размеров мишени (ширины/высоты) до/после (соответственно, площадь будет меньше в  $K^2$  раз), а вычисляется отношением расстояния до мишени к базовому ( $D_{1:1}=23,256$  м, см. выше), т. е. линейно связан с моделируемой дальностью до цели  $D$ :

$$k' = \frac{D}{D_{1:1}} = \frac{1}{k}.$$

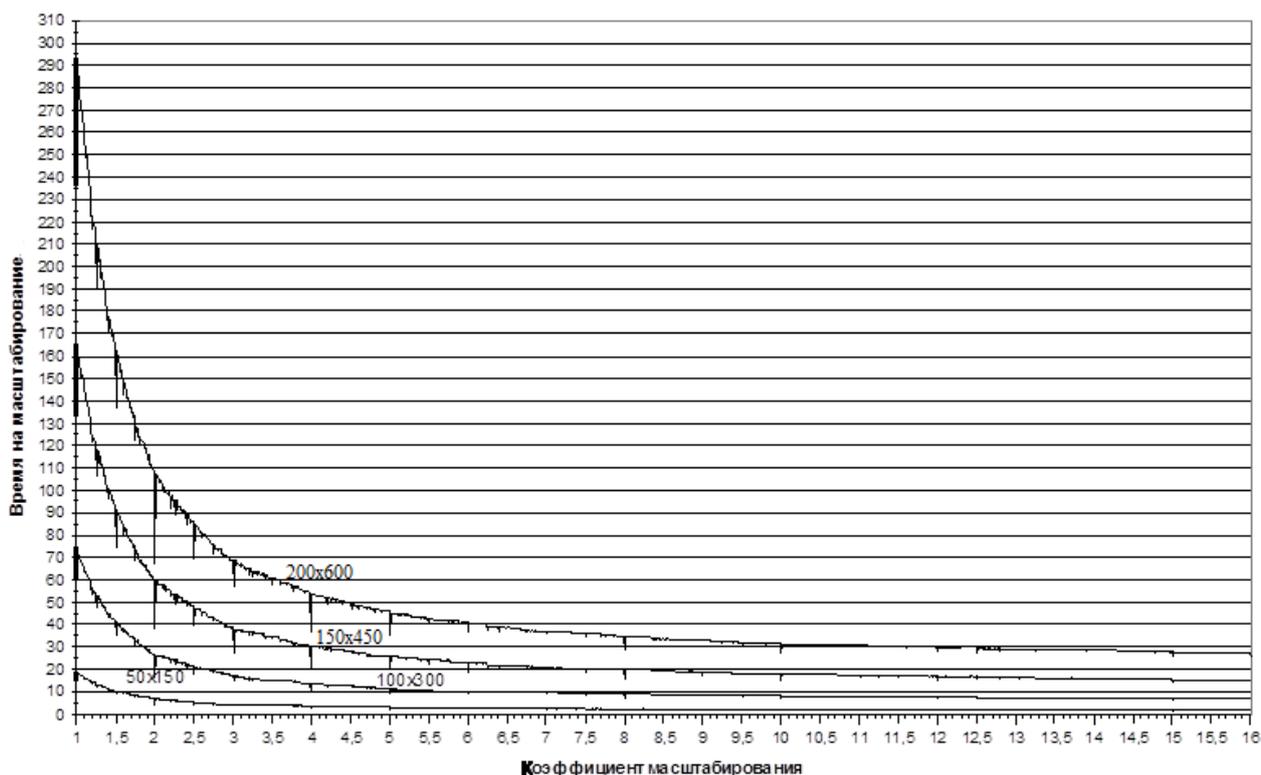


Рис. 5. Время масштабирования

Fig. 5. Scaling time

При оценке быстродействия масштабирования и вывода мишеней (рис. 5) использовались одинаковые тестовые изображения четырех типовых размеров  $X \times Y$  ( $50 \times 150$ ,  $100 \times 300$ ,  $150 \times 450$ ,  $200 \times 600$  пикселей) с 15 % «прозрачного» фона и  $K=1 \dots 16$ . При  $K \approx 1$ , т. е. малом масштабировании изображений  $X \times Y$ , все время алгоритма тратится на отображение  $\approx X \times Y$  точек (округление результирующего размера мишени всегда идет в большую сторону до целого), что относительно медленно. При повышении  $K$  время на отображение начинает резко уменьшаться, т. к. уменьшается количе-

ство выводимых точек (так при  $K = 2$  выводится лишь  $X/K \times Y/K = X \times Y / 4$  точек), но возрастает время на само масштабирование и смешивание, когда для получения одной точки вывода рассчитать нужно в общем случае до  $(K_{ц} + 2)^2$  исходных точек, где  $K_{ц}$  – целая часть коэффициента масштабирования. Для подробного анализа рис. 5 для мишени  $200 \times 600$  построен график функции относительных выбросов времени (рис. 6):

$$A = \frac{t_i - t_{i+1}}{t_i}.$$

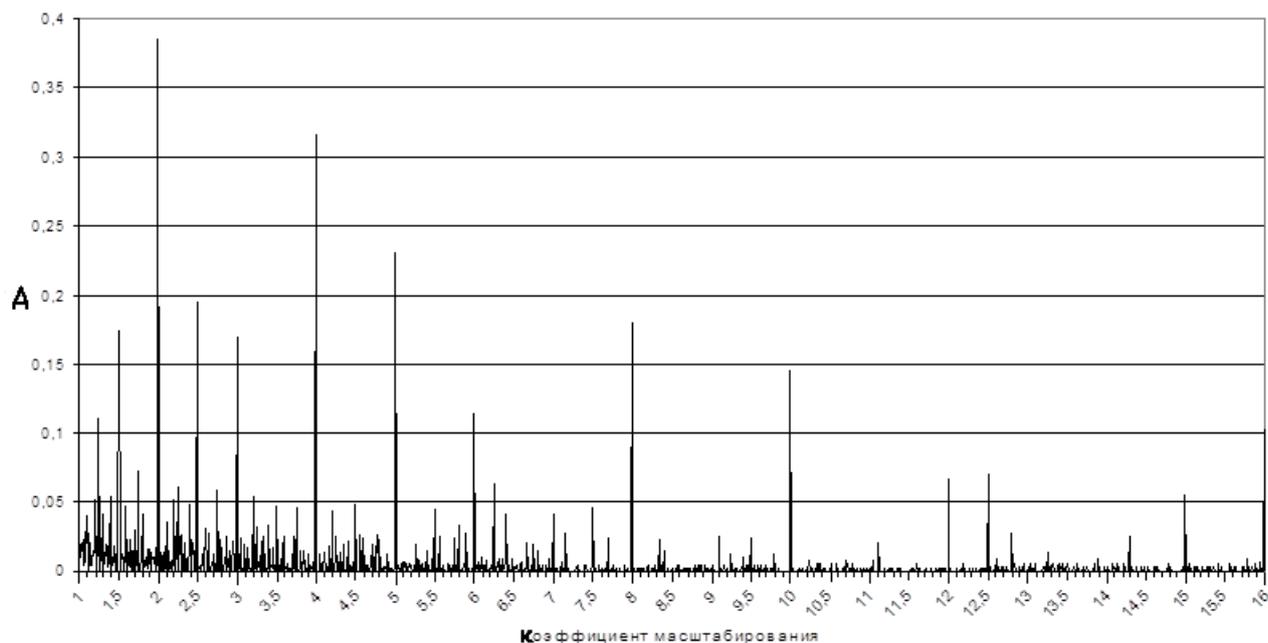


Рис. 6. Выбросы быстродействия масштабирования

Fig. 6. Scaling Performance Emissions

На графиках (рис. 5, 6) четко видны аномальные выбросы быстродействия на «круглых» значениях  $K$  (кратных 1,0, 0,5, 0,25, в том числе и при ровно  $K=1$ ), что при целом  $K$  связано с расчетом в этом случае лишь  $(K_{ц})^2$  точек на результирующую (еще и при относительно меньшем их количестве для вывода), а при кратности  $K$  0,5, 0,25 и т. п. не более  $(K_{ц}+1)^2$  точек (например, скорость при  $K=2$  и при  $K \approx 3,2$  одинаковы (рис. 5), когда усредняются  $2*2$  точки против  $4*4$  – в 4 раза больше, а выводится в 4 раза меньше точек против  $\approx 10$  раз, т. е. в  $\approx 2,5$  раза меньше). Также влияет на выбросы кратность  $K$  размеру исходного изображения (при нечетных целых  $K$  выбросы минимальны). А при  $K \rightarrow \max$  время приближается к усреднению всех  $X*Y$  исходных точек и выводу лишь обязательной одной. В общем (без учета выбросов, рис. 5) зависимость времени от  $K$  носит степенной характер и экспериментально аппроксимируется функцией:

$$t = t(K) = XY(C1(K)^{-1,62} + C2), \quad (2)$$

$$C1 = 0,00227, \quad C2 = 0,000208.$$

Выбросы быстродействия усложняют оценку эффективности предмасштабирования (однократное предварительное масштабирование изображений мишеней), которое должно сокращать время окончательного масштабирования изображений, производимое уже в циклической части алгоритма отображения мишенной обста-

новки. Обратный коэффициент предмасштабирования  $k'$  ( $0 \dots 1$ ) показывает, как близко от дальности без масштабирования  $D_{1:1}$  располагается объект при предварительном масштабировании по сравнению с моделируемым положением  $D$ , что соответствует переносу цели на расстояние  $D'$  (расположенным между  $D_{1:1}$  и  $D$ ) и вычисляется как  $k' = \frac{D - D'}{D - D_{1:1}}$ .

При этом, когда  $k'=1$ , предмасштабирование не производится, а при  $k'=0$  предмасштабированное изображение совпадает с результирующим на  $D$  (а это минимальное расстояние до мишени по сценарию упражнения). Получается, что на предварительном этапе алгоритма генерируется промежуточное уменьшенное изображение с  $K_1 = \frac{K}{(1+k'(K-1))} = \frac{D}{D + D_{1:1} - D'}$ , которое затем в цикле алгоритма уменьшается с коэффициентом  $K_2 = (1+k'(K-1)) = \frac{D + D_{1:1} - D'}{D_{1:1}}$ , а итоговое уменьшение с  $K = K_1 K_2 = \frac{D}{D_{1:1}}$ .

Для анализа соотношения времен с предмасштабированием и без в (2) подставляется сначала  $K_2$  (учитывая, что размер изображения после предмасштабирования по вертикали и горизонтали уменьшается в  $K_1$  раз, а всего в  $K_1^2$ ) и потом  $K$  в (2). Получается:

$$dt(K) = \frac{t'}{t} = \frac{t(K_2)}{t(K)} = \frac{(1+k'(K-1))^2(C_1(1+k'(K-1))^{-1,62} + C_2)}{K^2(C_1K^{-1,62} + C_2)}, \quad (3)$$

где  $t'$  – время масштабирования с предмасштабированием  $k'$ ;  $t$  – время масштабирования без предмасштабирования;  $K$  – текущий коэффициент уменьшения исходного изображения мишени по горизонтали и по вертикали от ее дальности  $D$ . Для нескольких значений  $K$  графики (3) представлены на рис. 7.

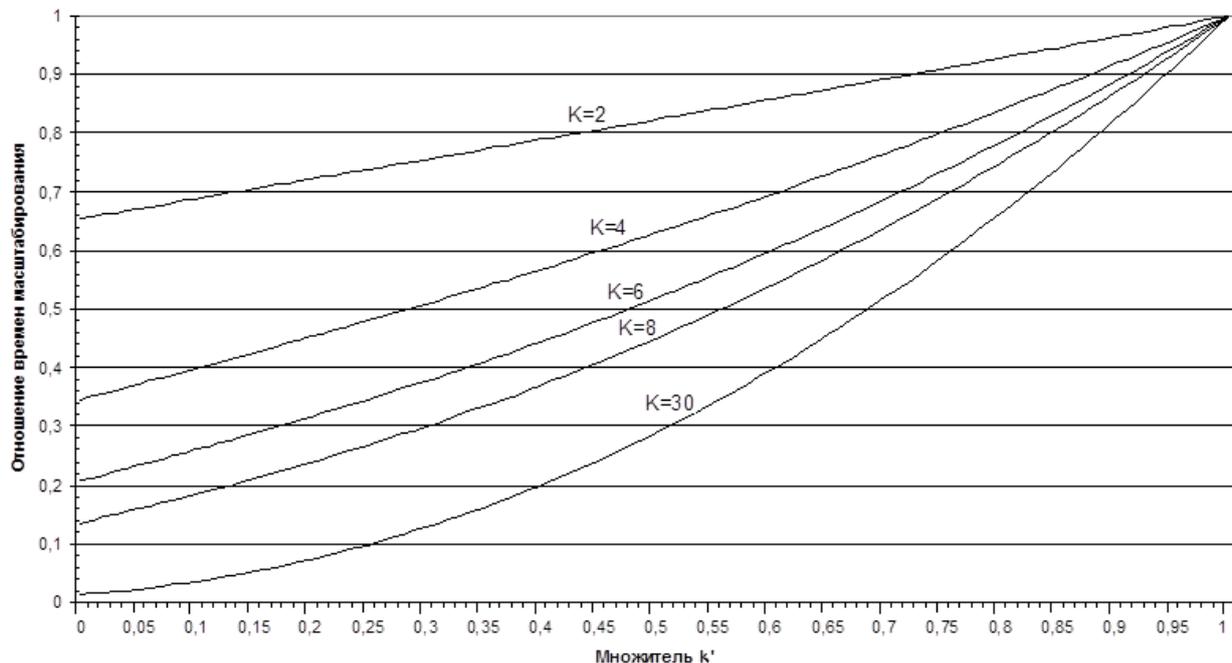


Рис. 7. Выигрыш времени масштабирования после предмасштабирования  $k'$

Fig. 7. Gain time scaling after  $k'$  pre-scaling

Как видно из рис. 7 (который не учитывает выбросы быстродействия), относительный выигрыш во времени возрастает при увеличении коэффициента  $K$  и уменьшении  $k'$  и не зависит от размеров исходного изображения (в (3) нет  $XU$ ). Но чтобы учесть еще и относительные выбросы (см. рис. 6, максимальный выброс от теоретического  $A = 0,38$  при  $K = 2$  или  $A = 0,32$  при  $K = 4$ ) и не получить даже замедления алгоритма при малых целых  $K$  (см. рис. 7, при  $K = 2$  любой  $k'$  дает замедление  $(1 - A(2)) = 0,62 > dt(2)$ , а при  $K = 4$  дает замедление  $(1 - A(4)) = 0,68 > dt(4)$  когда  $k' > 0,6$ ), предмасштабирование рекомендуется использовать лишь при  $K > 4$  (правда,  $K = 2$  соответствует минимальному расстоянию до мишени  $\approx 46,5$  м, что встречается очень редко в упражнениях). Только при малом  $k'$  и большом  $K$  (когда выражение (3) принимает значе-

ние, много меньшее, чем 0,65 на рис. 7) гарантируется выигрыш времени и большинство упражнений Курса стрельб как раз с мишенями на дистанции 150...300 м, когда  $K \approx 6...12$ , т. е. предмасштабирование оправданно.

Для определения оптимального  $k'$  необходимо оценивать отношение «качество-быстродействие», а для оценки качества уменьшения изображений мишеней использовать экспертный метод. Априори понятно, что чем меньше  $k'$ , тем менее качественное окончательное масштабирование получается, но быстродействие при этом возрастает. Экспертная оценка [27] показывает, что качество изображения неприемлемо при коэффициенте  $k'$  меньше 0,5, а из таблицы быстродействия движения 5 мишеней  $50 \times 150$  видно, что при  $k' < 0,5$  не получается и существенного снижения времени вывода.

## Время подготовки и вывода кадра с 5 мишенями, мс

## Time of preparation and output of frame with 5 targets, ms

| Дальность            | $k' = 1$ | $k' = 0,833$ | $k' = 0,667$ | $k' = 0,5$ | $k' = 0,333$ | $k' = 0,167$ | $k' = 0$ |
|----------------------|----------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|----------|
| 50 м $K \approx 2$   | 44,6     | 47,0         | 44,6         | 42,0       | 39,6         | 37,9         | 32,7     |
| 100 м $K \approx 4$  | 22,8     | 20,2         | 13,8         | 14,1       | 13,3         | 12,6         | 10,9     |
| 150 м $K \approx 6$  | 18,3     | 12,6         | 9,7          | 8,6        | 8,3          | 7,4          | 7,6      |
| 200 м $K \approx 8$  | 16,2     | 9,5          | 7,3          | 6,5        | 6,4          | 5,9          | 5,5      |
| 250 м $K \approx 10$ | 14,8     | 7,5          | 5,4          | 5,3        | 5,3          | 5,3          | 5,3      |
| 300 м $K \approx 12$ | 14,0     | 6,4          | 5,3          | 5,1        | 4,6          | 4,3          | 4,3      |
| 350 м $K \approx 14$ | 13,8     | 6,3          | 5,1          | 4,3        | 4,3          | 4,2          | 4,2      |

Таким образом, в результате исследований по критерию «быстродействие-качество» алгоритма предмасштабирования и вывода со смешиванием границ изображений мишенной обстановки определен оптимальный коэффициент предмасштабирования  $k' = 0,5$ , что соответствует

$$k' = \frac{D - D'}{D - D_{i1}} = 0,5, \quad D' = \frac{D + D_{i1}}{2}.$$

**Выводы**

Анализ математического обеспечения для поддержки реалистичной мишенной обстановки показал:

1. Изображения мишеней хранятся в файлах BMP в формате RGB в масштабе  $1 \text{ pix}^2 = 1 \text{ см}^2$  и используются в алгоритме однократного предварительного уменьшения их размера для ускорения оперативного циклического точного масштабирования с одновременным сглаживанием границ при выводе уменьшенных мишеней на изображении стрельбища с использованием информации о площади пикселя и дробных координатах мишени, что делает процесс их перемещения визуально плавным, а значит, максимально реалистичным.

2. Исследования быстродействия алгоритма показали существенные выбросы быстродействия при кратных 0,25 значениях коэффициента масштабирования и выявили оптимальный коэффициент предмасштабирования ( $k' = 0,5$ ), который не только сохраняет визуальную реалистичность мишеней, не внося видимых дополнительных искажений, но и обеспечивает необходимую скорость отображения мишенной обстановки по требованиям ТТЗ.

Таким образом, исходя из актуальности использования электронных стрелковых тренажеров предлагается базироваться в дальнейших исследованиях и разработках на предложенные и испытанные математические модели представления и отображения мишенной обстановки с предмасштабированием и сглаживанием границ при уменьшении, что благодаря высокой

гибкости программного обеспечения позволяет без видимых задержек реалистично изображать 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](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., Веркуенко 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. Егоров С. Ф., Казаков В. С., Коробейников В. В. Регистратор точки прицеливания на базе видеокамеры // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1 (17). С. 177–182.

12. 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.

13. 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.

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

15. 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.

16. 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.

17. Коряковцев Д. А., Плеишников 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.

18. Синютин Ю. В., Цуканов А. С. Перспективы использования электронных стрелковых систем в учебном процессе по огневой подготовке сотрудников правоохранительных органов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 3-4 (153-154). С. 147–154.

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 лазер-

ного интерактивного высокоточного комплекса «БЛИК-ВТ» // Вестник военного образования. 2022. № 3 (36). С. 28–33.

23. Егоров С. Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: функциональная схема программного обеспечения // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 2. С. 19–29. DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29.

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

25. Смирнов А. А., Егоров С. Ф. Повышение быстрой реакции 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.

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

27. 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](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 (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., Verkienko 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. Egorov S.F., Kazakov V.S., Korobeynikov V.V. *Registrator tochki pritselivaniya na baze videokamery* [Camera-based targeting point recorder]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 1, pp. 177-182 (in Russ.).
12. Prekina T.A., Gvozdev A.K., Mudrik I.A. *Osvoenie ognevoi podgotovki kursantami MVD v sovremennoy mire s primeneniem innovatsionnykh tekhnologii* [Development of fire training by students of the MIA in the modern world using innovative technologies]. *Epokha nauki*, 2020, no. 23, pp. 79-82 (in Russ.).
13. 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.
14. Nikiforov P.V., Muzafin R.R. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov v podgotovke sotrudnikov OVD* [Use of shooting simulators in training of IAO]. *Evraziiskii yuridicheskii zhurnal*, 2020, no. 3 (142), pp. 275-276 (in Russ.).
15. 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.).
16. 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.).
17. 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.
18. Sinyutin Yu.V., Tsukanov A.S. *Perspektivy ispol'zovaniya elektronnykh strelkovykh sistem v uchebnoy protsesse po ognevoi podgotovke sotrudnikov pravookhranitel'nykh organov* [Prospects for the use of electronic rifle systems in the training process for the fire training of law enforcement officers] *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*. 2021, 3-4 (153-154), pp. 147-154 (in Russ.).
19. Pershin A.T., Bol'shakova V.A., Gusevskaya K.S. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov «Rubin» v professional'noi podgotovke sotrudnikov politzii* [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 elektronnykh trenazherov na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke* [Practical significance of using electronic simulators in fire training classes] *Evraziiskii 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. Egorov S.F. *Strelkovyi trenazher «Ingibitor»: funktsional'naya skhema programmnogo obespecheniya* [Shooting simulator «Inhibitor»: functional diagram of the software]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 19-29 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29.
24. 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.).
25. 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.).
26. 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.).

27. 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»: Target Layout Mathematical Support

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

*Mathematical support of target layout with pre-scaling during storage and mixing of target image boundaries is described when displaying on a shooting range for the optical-electronic shooting simulator-"Inhibitor" developed at Institute of mechanics UdmFRC UB RAS and at Computer Engineering department of Kalashnikov ISTU jointly with JSC «Kalashnikov» Concern».*

*The tactical and technical task for the implementation of the target layout is given: support for all targets from the Shooting Course and realistic targets, the angular dimensions of objects on the screen must correspond to the real ranges to them, and the speed of visualization algorithms allows simultaneously displaying at least 32 targets with a frequency of at least 25 frames/s. When developing mathematical support, the BMP format for storing TrueColor images with the scale of 1 pixel = 1cm<sup>2</sup> was chosen, scaling targets to speed up further processing and the obligatory mixing of object-background border colors when displaying fractional coordinate support with pixel fractions of greatly reduced targets on the screen (so a thoracic target 50 cm wide at a distance of 100 m should be 12.8 points wide, while at a distance of 600 m - 2.13 points only) was emphasizes. The carried out studies of mathematical support performance for the target layout images formation confirmed compliance with the tactical and technical task requirements and recommended a pre-scaling factor of 0.5 (1:2) for optimal «quality-performance» ratio.*

*Based on the prospects for further research and development of electronic shooting simulators and due to the improvement of computing tools and the development of software graphics libraries, it is necessary to expand the efficiency of simulators and reduce costs, which means to increase competitiveness, for example, by increasing the target layout display realism.*

**Keywords:** shooting simulator, coordinate system, mathematical model, target, scaling images, anti-aliasing (mixing of boundaries).

Получено: 06.04.23

#### Образец цитирования

Егоров С. Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение мишенной обстановки // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 81–92. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-81-92.

#### For Citation

Egorov S.F. [Shooting simulator «Inhibitor»: target layout mathematical support]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 81-92 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-81-92.