

УДК 681.518.3

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-22-32

Исследование оптической цифровой мишени на базе высокоскоростной ПЗС-линейки

А. И. Кириллов, кандидат технических наук,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Е. Ю. Шелковников, доктор технических наук, профессор,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В. Н. Сяктерев, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. Ю. Петухов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Актуальность разработки и исследования обосновывается необходимостью при производстве стрелкового вооружения проводить его контроль, в том числе на кучность стрельбы. Предложено опираться на цифровые мишени на базе общедоступных компонент. Описываются требования к оптическим цифровым электронным мишеням трех классов предназначения (сверхзвуковые, околозвуковые и дозвуковые), разработана структура конструкции и выбраны стандартные оптические и цифровые компоненты для мишени сверхзвукового контроля кучности стрелкового оружия. Принцип работы мишени основан на пересечении объектом оптической плоскости с созданием «тени» на высокоскоростной ПЗС-линейке и фиксации ее координат. На макете мишени (только с одной координатой) в результате исследований проведены настройки блока управления высокоскоростной ПЗС-линейки TSL1401CL на базе микроконтроллера STM32F4 (через прямой доступ к памяти и три таймера, а также каскадной схеме коммутации блоков АЦП). Введена нормализация данных, полученных от ПЗС из-за неравномерности яркости оптической системы. Предложена математическая модель на базе регрессионных уравнений для компенсации нелинейных искажений, вносимых оптической частью мишени. Разработана методика по юстировке (настройка оптической части) и тарировке (настройка цифровых блоков) мишени. Испытания макета мишени показали возможность использования предложенной схемы конструкции на базе общедоступных оптических и цифровых компонент с возможностями масштабирования. Погрешность определения координат составила 0,143 см (с.к.о.). Необходимо постоянно расширять возможности автоматизации производства, повышать эффективность и безопасность операции контроля стрелкового вооружения, снижать его себестоимость, а значит, повышать конкурентоспособность электронных цифровых мишеней.

Ключевые слова: ПЗС-линейка, линза Френеля, микроконтроллер, нормализация, погрешность.

Введение

Разработка электронных мишеней для контроля качества стрелкового оружия является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам (ГОСТ 28653–2018), требует как минимум контроля кучности стрельбы, и автоматизация этого процесса является актуальной задачей. Электронные мишени фиксируют точки попадания в неразрушаемую плоскость и позволяют вычислить координаты и, значит, оценить кучность в реальном времени, что ускоряет технологический процесс контроля [1, 2].

Актуальность дальнейшего исследования и разработки электронных стрелковых мишеней основана на высокой эффективности их использования, особенно на первоначальном этапе контроля партий оружия, а также и на этапах усовершенствования и исследований в том числе для совершенствования математических моделей. Кроме этого, электронные мишени отличаются безопасностью, т. к. не требуют нахождения персонала в опасной зоне в случае ручных замеров.

Целью статьи является описание разработки и исследования оптической цифровой электронной мишени (ОЦЭМ) на базе ПЗС-линейки с микрокон-

троллерным управлением и с использованием лазерных оптических плоскостей.

Тактико-техническое задание

Для измерения параметров сверхзвуковых объектов (400–1000 м/с) традиционно использовались быстроедействующие аналоговые акустические или оптические информационно-измерительные системы [3–7], сейчас популярны телевизионные (высокоскоростная съемка), лазерные и радиолокационные системы [8–14], но они имеют специфическое применение (чаще только для измерения скорости). Эти системы отличаются или высокой стоимостью, или громоздкостью и уникальностью конструкции, или высокой энергоемкостью и сложностью настройки, хотя имеют высокую точность в идеальных условиях, но иногда избыточную функциональность для задачи контроля кучности в условиях закрытого тира. Разрабатываемая оптическая цифровая электронная мишень основана на цифровых общедоступных технологиях и должна, сохранив приемлемую точность измерения, расширить функциональные возможности за счет компактности, мобильности и простоты. Выбрана конструкция на базе ПЗС-линейки с проекцией «тени» быстро пролетающего объекта на

ее рабочую зону от световой лазерной плоскости [15–18].

Итак, разработка и исследование ОЦЭМ для координатного контроля сверхзвуковых процессов на базе цифровой фотоувствительной линейки с универсальным блоком управления (БУ) на базе микроконтроллера (МК) со стандартными интерфейсами является актуальной задачей и может найти применение в широких областях деятельности.

Простота ОЦЭМ основана на непосредственном определении координат быстро перемещающихся объектов, пересекающих ее оптическую плоскость, и базируется на общедоступных цифровых технологиях. Существующие аналоговые мишени (акустические и оптические) используют косвенные методы измерения и одноточечные аналоговые датчики, измеряющие координаты по временным отсечкам сигналов с них и поэтому на их точность накладывается влияние множества косвенных факторов. В разрабатываемой системе непосредственных оптических измерений количество факторов, влияющих на погрешность, уменьшено за счет использования стандартных элементов и упрощенной математической модели по сравнению с аналоговыми (особенно в области ее тарировки).

Структурная схема двухкоординатной ОЦЭМ приведена на рис. 1. Лазерный излучатель формирует непрерывную лазерную плоскость в виде исходящего из точки треугольника лучей лазерного излучения (примерно 90 градусов).

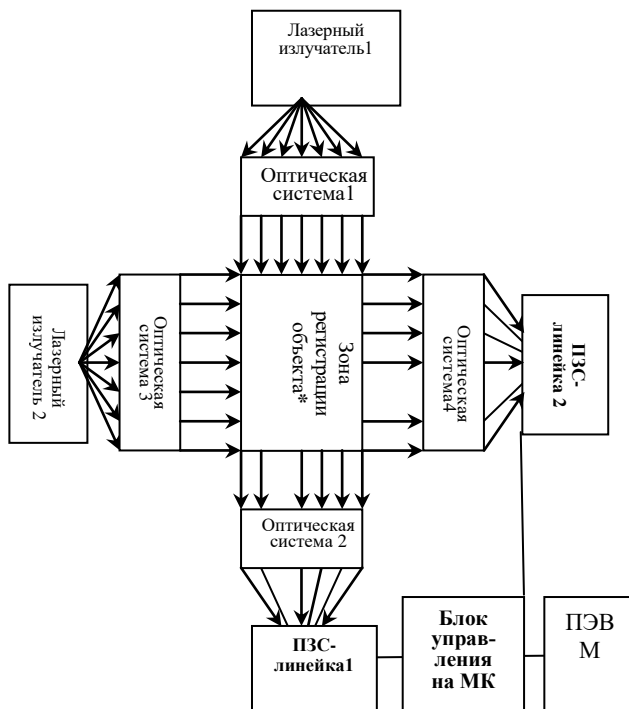


Рис. 1. Структурная схема двухкоординатной ОЦЭМ

Fig. 1. Structural diagram of two-axis ODET

Первая оптическая система (например, линза Френеля) преобразует исходящий из точки пучок в

параллельный поток лучей. Объект контроля пересекает параллельный поток лучей и частично экранирует его (это отражено прерыванием луча на схеме от *).

Вторая оптическая система (идентичная первой) фокусирует принятый пучок лучей на линейчатом фотоувствительном элементе – ПЗС-линейке, – который непосредственно фиксирует координаты затемнения от объекта и через блок управления, на базе микроконтроллера (МК), передает их в ПЭВМ для дальнейшего анализа.

Для измерения двух координат, что и требуется в электронных мишенях, вторая лазерная сканирующая система под углом 90 градусов устанавливается на небольшом удалении от первой. Такой подход позволяет измерять скорость быстро пролетающего объекта, используя разность времен пересечения двух лазерных плоскостей, находящихся на базовом расстоянии.

Оценка быстродействия требуемой ПЗС-линейки для ОЦЭМ М (т. е. количество строк в секунду) исходит из максимального назначения ОЦЭМ (контроль баллистики огнестрельного оружия), но учтены минимальные возможности (контроль движения затворной рамы) и базовые (контроль баллистики пневматического оружия), и основана на формуле

$$M = \frac{K \cdot V}{L}, \quad (1)$$

где V – скорость объекта в зоне регистрации; L – размер объекта поперек плоскости регистрации; K – коэффициент перекрытия фиксации объекта в соседних циклах сканирования (1..4): чем больше K , тем выше надежность фиксации координат объекта системой, но и тем выше требование к быстродействию ПЗС-линейки.

Табл. 1 задает три уровня назначения ОЦЭМ: максимальное – для контроля сверхзвукового стрелкового оружия, базовое – для контроля околозвукового пневматического оружия и минимальное – для исследований дозвукового движения затворной рамы (в последнем случае ОЦЭМ однокоординатная).

Для сверхзвукового стрелкового оружия максимальное значение частоты сканирования строк ПЗС-линейки не превышает 50 кГц ($K=1.1$).

Для ПЗС-линейки с 256 элементами, а это оптимальные требования, когда инструментальная погрешность не превышает $\pm 0,5$ мм при рабочей зоне регистрации 25 см (минимальные же требования 128 элементов при ширине 13 см), тактовая частота работы ПЗС при максимальных скоростях должна составлять не менее 13 МГц ($50000 \cdot 256$).

Частота будет возрастать вдвое при каждом удвоении количества светочувствительных элементов (для повышения точности фиксации координат или увеличения зоны регистрации): 512 элементов – 26 МГц, 1024 элемента – 52 МГц – и уменьшаться вдвое при сокращении ширины рабочей зоны: 13 см и 128 элементов – 7 МГц.

Таблица 1. Оценка быстродействия требуемых ПЗС-линеек при $K=1$ Table 1. Evaluation of performance of required CCD lines at $K=1$

Назначение	Скорость объекта V , м/с	Длина объекта L , мм	Быстродействие ПЗС M , стр/сек
Максимальное	700–1000	20–32	22000–45000
Базовое	50–150	4,5–28	1800–33500
Минимальное	1–10	5–50	20–2000

Таким образом, сформулированы основные технические требования к ОЦЭМ.

Выбор ПЗС-линейки

Основные замеры параметров цилиндрического объекта длиной около 2,5 см осуществляются на дальности не более 100 м, где его скорость может составлять 800–850 м/с, что и является нижней границей быстродействия ОЦЭМ (верхняя граница – 1000 м/с и более).

Рассмотрим одну из двух координат ОЦЭМ (рис. 2).

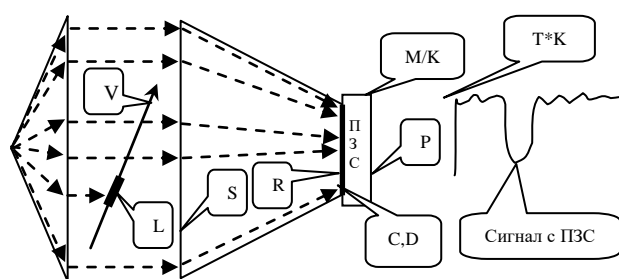


Рис. 2. Функциональная схема и характеристики ОЦЭМ

Fig. 2. Functional diagram and characteristics ODET

Оценка инструментальной точности ОЦЭМ – пространственной ΔI и временной ΔT – предполагает «идеальность» оптической части системы (лазер + линзы) и опирается исключительно на технические возможности ПЗС-линеек и размеры зоны регистрации и объекта. Технические характеристики ПЗС ОЦЭМ (рис. 2):

L – длина объекта контроля (типично 20...32 мм);

V – скорость объекта контроля в зоне регистрации (800...1000 м/с);

S – ширина рабочей зоны регистрации (типично 130...500 мм);

K – коэффициент перекрытия фиксации объекта в соседних циклах ПЗС-сканирования (1...4), чем больше, тем выше надежность фиксации объекта, но и выше требование к быстродействию ПЗС;

M – быстродействие ПЗС-линейки в строках в секунду (не менее 44 К);

R – рабочий размер ПЗС-линейки (типично 5...25 мм);

P – разрешение ПЗС-линейки (типично 128...2048 pix);

D – плотность пикселей ПЗС-линейки (dpi);

C – размер пикселя ПЗС-линейки (мкм);

Все характеристики ОСИ связываются формулами:

$$M = K \frac{V}{L} \quad C = \frac{R}{P} \quad R = \frac{P}{D} \cdot 2.54,$$

$$\Delta I = \pm \frac{1}{2} \frac{S}{P} = \pm \frac{1}{2} \frac{SX}{R} \quad \Delta T = \frac{1}{K} \frac{L}{V} = \frac{1}{M}.$$

Например, при $S=25$ см и $P=512$ pix $\Delta I=\pm 0,24$ мм, что является низкой погрешностью, а при $S=50$ см и $P=128$ pix $\Delta I=\pm 1,95$ мм, что уже недостаточно для измерительной системы. При $L=2,5$ см и $V=900$ м/с с $K=2$ получаем $\Delta T=0,00001389$ с или $M=72000$ строк/с – основное требование к быстродействию ПЗС-линейки, т. е. для ОЦЭМ в идеале необходимы ПЗС не хуже $P=512 \times 40$ МГц, что еще входит в относительно общедоступный сегмент, например фирмы Hamamatsu S11105 (табл. 2). Но по экономическим соображениям можно остановиться и на конфигурации 128×8 МГц (TSL1401CL, рис. 3) при $S=13$ см и $P=128$ pix получаем приемлемую $\Delta I=\pm 0,5$ мм и $M \approx 62000$ строк/с (с $K=1,7$), что вполне достаточно для экспериментов со сверхзвуковыми объектами и не исключает дальнейшее масштабирование конструкции мишени.

Таблица 2. Доступные ПЗС-линейки

Table 2. Available CCD lines

Наименование ПЗС-линейки	Разрешение P , pixel	Тактовая частота, МГц	Быстродействие M , К, стр/с	Цена, руб
IC-LF OBGA LF3C	128	5	39	850
IC-LF1402	256	5	19,5	1550
IL-C3/C4	до 2048	60	28,7	На заказ
TSL1401CL	128	8	62,5	1800
S11105	512	50	88,5	9000
S12379	2048	150	72	На заказ
S12198-512Q	512	10	18,5	На заказ

Из-за высокой тактовой частоты работы ПЗС необходимы блоки управления (БУ) на базе микрокон-

троллера (МК, рис. 3) с частотой, на порядок превышающей частоту работы ПЗС, и со стандартными

интерфейсами и наборами ЦАП/АЦП, но, например, у TSL1401CL БУ встроен в сборку и МК должен обеспечить лишь тактирование, запускать сканирование и принимать данные строки.

Итак, в идеале, МК должен управлять двумя ПЗС-линейками (согласно временным диаграммам, рис. 4), получать от них информацию и фиксировать полезные данные строки (с единым текущим временем для обеих линеек). Сигналы (рис. 4): CLK – тактовая частота (до 8 МГц), SI – инициализация сканирования, AO – выходные аналоговые данные. То есть МК в цикле запускает считывание информации с двух ПЗС-сборок (координаты X и Y) и фиксирует текущее время анализа строки, выделяет начало-конец полезного сигнала (рис. 2) и выдает их на головной

компьютер по стандартному интерфейсу (USB), где информация анализируется и вычисляется еще и скорость V.

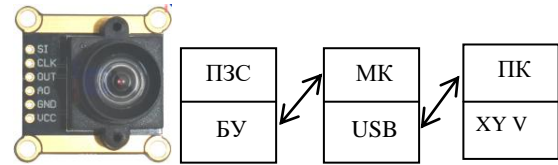


Рис. 3. ПЗС-сборка TSL1401CL и схема ОЦЭМ

Fig. 3. CCD Assembly TSL1401CL and Scheme ODET

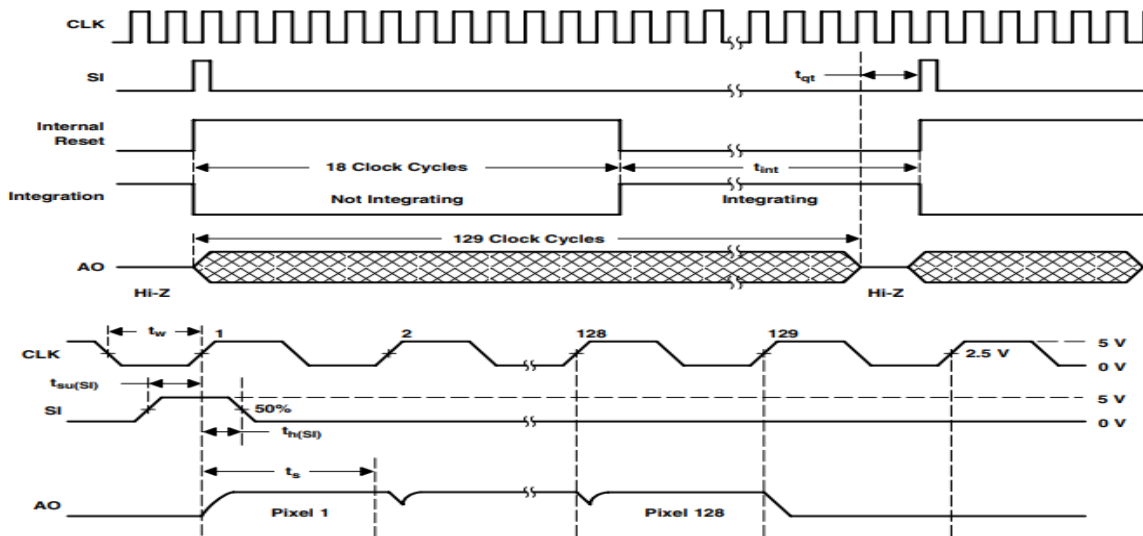


Рис. 4. Временные диаграммы управления ПЗС-линейки TSL1401CL

Fig. 4. CCD Control Timeline TSL1401CL

Таким образом, для реализации высокоскоростной оптической системы измерения сверхзвукового перемещения объекта (400–1000 м/с) выбраны следующие комплектующие конструкции макета ОЦЭМ на базе ПЗС-линейки TSL1401CL [18] на 128 пикселей и с тактовой частотой до 8 МГц (потенциально до $M \approx 62$ К строк/с с $K=1,7$) с проекцией «тени» объекта измерения на рабочую зону линейки ($R=1$ см) от световой лазерной плоскости и с управлением от МК серии STM32F4 [19] (по паспорту АЦП которого как раз могут работать до 8 МГц). Это должно гарантировать фиксацию объекта длиной от 20 мм и со скоростью до 1000 м/с в оптической плоскости шириной при приемлемых $S=13$ см и $P=128$ pix (с возможностью масштабирования) и с инструментальной погрешностью $\Delta l = \pm 0,51$ мм.

Настройка микроконтроллера под ПЗС

Согласно документации на ПЗС-сборку TSL1401CL [20] для корректной ее работы требуется введение задержки после чтения 128 пикселей строки. На рис. 4 приведены осциллограммы работы ПЗС-линейки. Такая задержка должна быть 2 и более тактов (рис. 4, параметр t_{qt}). Тогда для определения кадровой частоты $F_{\text{кадр}}$ используем формулу:

$$F_{\text{кадр}} = \frac{F_{\text{CLK}}}{N_{\text{пикс}} + N_{\text{задер}}}, \quad (2)$$

где F_{CLK} – тактовая частота сигнала CLK; $N_{\text{пикс}}$ – количество пикселей (128); $N_{\text{задер}}$ – время задержки в тактах (≥ 2).

Таким образом, для $F_{\text{CLK}} = 8$ МГц и при $N_{\text{задер}} = 2$ такта, теоретическое значение кадровой частоты $F_{\text{кадр}} \approx 61538$ Гц, что является достаточным для обнаружения сверхзвукового объекта, проходящего через мишень.

Время импульса сигнала SI должно быть одинаковым с временем импульса тактового сигнала CLK. Тогда при заданном периоде тактового сигнала CLK $T_{\text{CLK}} = 0,125$ мкс, время импульса будет 62,5 нс для сигнала типа меандр. При этом период сигнала SI будет определяться по кадровой частоте и равен $\approx 16,25$ мкс.

Для обработки информации с ПЗС-линейки целесообразно применить МК STM32F407VET6 с тактовой частотой до 168 МГц, который удовлетворяет следующим требованиям:

- формирование тактового сигнала до 8 МГц (или больше);

- формирование стробирующего сигнала SI с очень малой величиной импульса (десятки наносекунд);
- наличие аналого-цифрового преобразователя от 10 бит и выше с частотой дискретизации 8 или выше МГц;
- наличие режима прямого доступа к памяти (ПДП);
- наличие интерфейсов для подключения к компьютеру (USB, UART и др.).

Для ускорения разработки программного обеспечения МК была использована среда CubeMX версии

Таблица 3. Параметры таймеров МК

Table 3. Parameters of MCU timers

Параметр	Таймер TIM1	Таймер TIM2	Таймер TIM3
Channel 1	PWM Generation CH1	Output Compare No Output (CH1)	Output Compare CH1
Mode	PWM mode 1	Active Level on match	Toggle on match
Trigger Output Event	–	Output Compare (OC1REF)	Output Compare (OC1REF)
Slave mode	Disable	Disable	Gated Mode (ITR1)
Period	PERIOD_SI - 1	SHIFT	PERIOD_TIMER - 1
Pulse	1	SHIFT	0
Выходы МК	PE9	–	PC6
Тактовая частота шины APBx, МГц	84 (шина APB2)	42 (шина APB1)	42 (шина APB1)

Параметр «Channel 1» является одним из 4 доступных каналов для каждого таймера. Для формирования короткого импульса целесообразно настроить первый таймер на режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ или PWM). Тогда выходной сигнал SI будет определяться коэффициентом заполнения в параметре «Pulse» (регистр «CCR1»), а также параметром «Prescaler»:

$$\begin{aligned} Prescaler_{SI} &= 2F_{PLCK2} \cdot t_{CLK} - 1 = \\ &= \frac{2F_{PLCK2}}{2F_{CLK}} - 1 = \frac{F_{PLCK2}}{F_{CLK}} - 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где FPLCK2 – тактовая частота внутренней шины МК APB2; 2FPLCK2 – тактовая частота работы блока таймера TIM2; tCLK – ширина импульса;

Целесообразно установить в параметре «Pulse» минимальное значение, при котором будет формироваться импульс, т. е. 1. В этом случае необходимо настроить период сигнала SI через параметр «Period», который зависит от периода кадра Tкадр и ширины импульса tCLK.

$$\begin{aligned} Period_{SI} &= \frac{T_{КАДР}}{t_{CLK}} - 1 = \frac{2F_{CLK}}{F_{КАДР}} - 1 = \\ &= 2(N_{ПВК} + N_{ЗАДЕР}) - 1 = PERIOD_SI - 1. \end{aligned} \quad (4)$$

Таймер 2 должен формировать паузу между запуском таймера 1 и таймером 3 таким образом, чтобы фронт сигнала CLK был внутри импульса сигнала SI, согласно рис. 4. Для этого используется режим «Active Level on match», т. е. формирование события при сравнении.

Согласно [21], для того чтобы сформировать задержку, нужно установить значение параметра

5.3.0, которая позволила сгенерировать проект с начальной инициализацией всех необходимых выводов и периферии.

Для формирования двух управляющих сигналов CLK и SI были использованы встроенные в МК таймеры TIM1 и TIM2 со следующими настройками (табл. 3).

Каждый таймер аппаратно «привязан» к своей шине APBx (APB1 или APB2). Это влияет на его тактовую частоту и в таблице приведены максимальные частоты этих шин.

«Pulse», при этом значение параметра «Period» должно быть больше или равно значению параметра «Pulse». Поскольку длительность импульса не представляет интереса в данном случае, то можно выставить данные параметры, равные некоторой величине SHIFT.

Данное значение необходимо подбирать эмпирически с помощью осциллографа в двухканальном режиме для сигналов CLK и SI, так как теоретический расчет затруднен тем, что при включении таймеров 1 и 2 выполняется код на МК, который также требует время на его обработку.

Таймер 3 должен генерировать сигнал CLK. Значения «Output Compare CH1» и «Toggle on match» определяют, как будет формироваться выходной сигнал. В данном случае выходной сигнал будет постоянно переключаться с низкого на высокий и с высокого на низкий логический уровень с частотой, определяемой параметром «Prescaler».

Тогда частота этих переключений должна быть в 2 раза больше требуемой частоты FCLK. В связи с этим формула для вычисления «Prescaler» (PrescalerCLK) сигнала CLK будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} Prescaler_{CLK} &= \frac{2F_{PLCK1}}{2F_{CLK} \cdot PERIOD_TIMER} - 1 = \\ &= \frac{F_{PLCK1}}{F_{CLK} \cdot PERIOD_TIMER} - 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где FPLCK1 – тактовая частота внутренней шины МК APB1; 2FPLCK1 – тактовая частота работы блока таймера TIM3.

Фактическое значение (т. е. внутри МК) параметра «Period» на единицу больше, поэтому в обоих случаях

(для двух таймеров) добавляем слагаемое «-1». Параметр «Period» также называют счетчиком переполнения. Минимальное значение параметра «Period» составляет 1, тогда «PERIOD_TIMER» и «N» должны быть больше или равно 2. Наличие в знаменателе (5) величины «PERIOD_TIMER» позволяет нивелировать параметр «Period» в целом. Тогда применение величины «PERIOD_TIMER» заключается в том, чтобы результат деления в (5) был целым, что позволит точно установить требуемую частоту FCLK.

Для преобразования из аналоговой информации в цифровую воспользуемся встроенным в МК аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который имеет 12 разрядов. Таких блоков в МК три, которые могут работать независимо или с чередованием (Interleaved mode), что позволяет повысить частоту опроса Фдискр:

$$F_{\text{дискр}} \leq \left(F_{\text{дискр max}} = \frac{F_{\text{PLCK2}} \cdot N_{\text{АЦП}}}{(N_{\text{захват}} + N_{\text{конв}}) \cdot \text{Prescaler}_{\text{АЦП}}} \right), \quad (6)$$

где $F_{\text{дискр max}}$ – максимальная достижимая частота дискретизации АЦП для заданных параметров без режима «ведущий-ведомый»; $N_{\text{захват}}$ – количество циклов для выборки входного сигнала; $N_{\text{конв}}$ – количество циклов конвертации; $\text{Prescaler}_{\text{АЦП}}$ – предделитель частоты FPLCK2; $N_{\text{АЦП}}$ – количество задействованных АЦП в режиме с чередованием.

Согласно документации, на ПЗС-линейку TSL1401CL, на каждый период сигнала CLK ПЗС-линейка формирует ответ на линии АО (рис. 4), т. е. частота дискретизации АЦП $F_{\text{дискр}}$ и частота сигнала CLK FCLK должны совпадать. Для повышения гибкости настройки частоты дискретизации АЦП целесообразно воспользоваться режимом «ведущий-

ведомый», когда один периферийный блок формирует событие для запуска другого периферийного блока. В этом случае в (6) имеем неравенство. На рис. 5 приведена структура взаимодействия всех необходимых блоков.

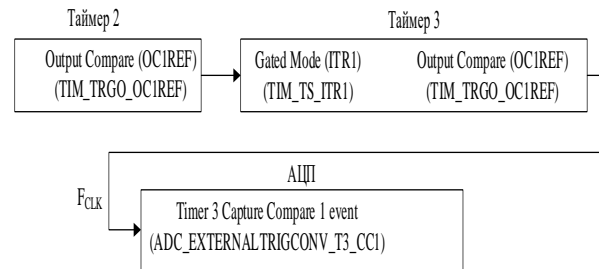


Рис. 5. Структура взаимодействия блоков МК

Fig. 5. Structure of interaction of MCU

В табл. 4 приведены возможные частоты и параметры таймера 3 и блока АЦП. Частота FCLK вычислена для каждого PrescalerCLK по формуле (5). Для обоих формул тактовая частота внутренней шины МК APB1 FPLCK1 составляет 42 МГц – это максимальная возможная частота для данного МК. Для (5) PERIOD_TIMER = 2 как минимально возможное значение (см. выше).

Для вычисления максимальной кадровой частоты $F_{\text{кадр max}}$ применялась формула (2) при $N_{\text{пикс}} = 128$ пикселя и $N_{\text{задер}} = 2$ пикселя. При уменьшении частоты FCLK также целесообразно уменьшать частоту дискретизации АЦП путем увеличения, в первую очередь, предделителя PrescalerАЦП ($N > 3$). Это позволит снизить уровень шумов АЦП согласно [22].

Таблица 4. Расчетные частоты таймера 3 и блока АЦП

Table 4. Calculated frequencies of timer 3 and ADC unit

N	PrescalerCLK	FCLK = Fдискр, МГц	Fдискр.max., МГц	Nзахват	PrescalerАЦП	NAЦП	Fкадр. max, кГц
1	0	21,00	—	—	—	—	161,54
2	1	10,50	11,45	8	2	3	80,77
3	2	7,00	8,40	12	2	3	53,85
4	3	5,25	5,60	12	2	2	40,38
5	4	4,20	4,20	12	4	3	32,31
6	5	3,50	4,20	12	4	3	26,92
7	6	3,00	4,20	12	4	3	23,08
8	7	2,63	4,20	12	4	3	20,19
9	8	2,33	2,80	12	6	3	17,95
10	9	2,10	2,80	12	6	3	16,15

Из табл. 4 видно, что максимальная частота дискретизации АЦП составляет 11,45 МГц, т. е. выбранный МК удовлетворяет заданным требованиям. Самым оптимальным выбором является $N = 3$, так как частота FCLK = 7 МГц удовлетворяет рабочему диапазону частот ПЗС-линейки (см. табл. 2) и достижима максимальная разрядность АЦП (12 бит).

Необходимо отметить, что допустимые значения параметра $N_{\text{конв}}$ имеют нестандартный ряд (3, 15, 28, 56 и т.д.) из-за особенностей МК, в связи с этим для получения максимальной частоты дискретизации

АЦП для (6) взято минимальное допустимое значение $N_{\text{конв}} = 3$.

Из табл. 4 также можно сделать вывод, что применение режима «ведущий-ведомый» оправдано, так как шаг изменения частоты FCLK меньше, чем шаг изменения частоты максимальной дискретизации АЦП $F_{\text{дискр max}}$.

Как было отмечено выше, это позволяет повысить гибкость настройки общей частоты дискретизации $F_{\text{дискр}} = FCLK$. В этом случае неравенство (6) должно выполняться.

Была выполнена оценка влияния задержки $N_{\text{задер}}$ на форму выходного сигнала. Для этого был собран макет в соответствии со структурной схемой (рис. 1). В качестве источника света использовался светодиодный фонарик с формируемой освещенностью ~1000 люкс на ПЗС-линейке.

Результат таких измерений приведен на рис. 6, который показал, что с пикселя с номером 104 начинается линейное уменьшение амплитуды при $N_{\text{задер}} = 2$ единицы.

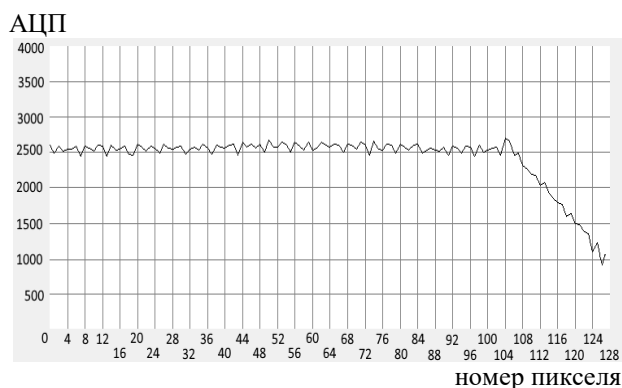


Рис. 6. График освещенности ПЗС-линейки при $N_{\text{задер}} = 2$ единицы

Fig. 6. CCD Ruler Illumination Curve at $N_{\text{задер}} = 2$ units

Экспериментально установлено, что оптимальным значением задержки $N_{\text{задер}}$ является 28 единиц, при котором график освещенности не имеет линейных спадов (рис. 7).

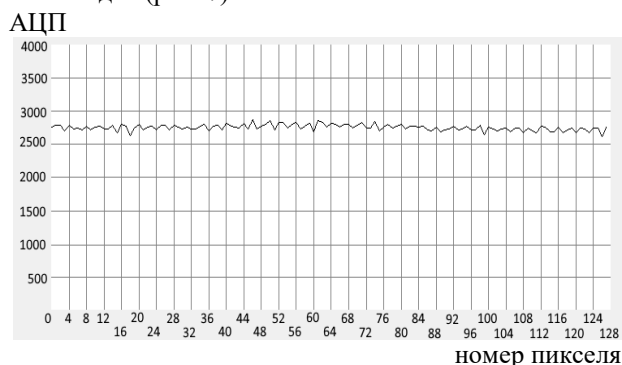


Рис. 7. График освещенности ПЗС-линейки при $N_{\text{задер}} = 28$ единицы

Fig. 7. CCD Ruler Illumination Curve at $N_{\text{задер}} = 28$ units

На всех графиках (рис. 6, 7) наблюдается общее увеличение амплитуды освещенности (с 0 до 104 номер пикселей) с ростом задержки $N_{\text{задер}}$, что позволяет увеличить динамический диапазон ПЗС-линейки.

Таким образом, теоретическое исследование и натурные испытания ПЗС-линейки позволили:

- обосновать выбор режима «ведущий-ведомый» для таймеров и блока АЦП. Это позволяет повысить гибкость настройки общей частоты дискретизации $F_{\text{дискр}}$:

- выбрать оптимальные параметры таймера 3 и блока АЦП, при которых достигается максимальная частота сигнала FCLK и разрядность АЦП;

- выбрать оптимальное значение задержки $N_{\text{задер}}$ для минимизации искажения графика освещенности ПЗС-линейки.

При увеличении задержки $N_{\text{задер}}$ до 28 единиц кадровая частота уменьшилась до 44,87 кГц (на 16,7 % меньше по сравнению с расчетным значением в табл. 2), что является минимально допустимым для обнаружения объекта, проходящего через световую мишень, длиной 2,5 см и скоростью не более 1000 м/с.

Таким образом, создан базовый макет ОЦЭМ для обнаружения объектов со сверхзвуковой скоростью, удовлетворяющий заданным требованиям.

Нормализация показаний ПЗС

Из-за неидеальности оптической подсистемы ОЦЭМ (лазер + линзы Френеля) сигнал с ПЗС-линейки получается искаженным. Так, на рис. 8, а показан сигнал только от лазерной засветки без линз, а на рис. 8, б уже с линзами Френеля, искажения связаны с низким качеством оптической системы (неравномерности яркости).

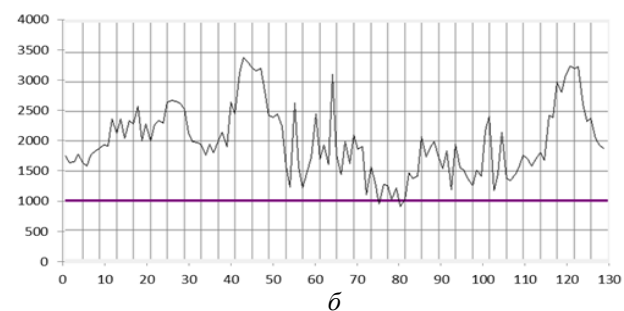
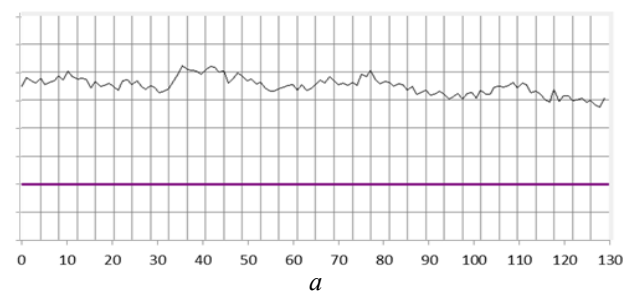


Рис. 8. Сигнал с ПЗС: а – только от лазера; б – от лазера с линзами Френеля

Fig. 8. CCD signal: a) only from laser b) from laser with Fresnel lenses

Чтобы снизить влияние оптической системы и избавиться от нелинейности сигнала, добавлена функция нормализации данных (фактически вычитание из получаемых данных сигнала с рис. 8, б), что позволяет добиться практически линейного сигнала при отсутствии объекта контроля, а сигнал от объекта контроля из визуально хаотичного (рис. 9, а) становится вполне различим (рис. 9, б), что позволяет эффективно определять его координаты.

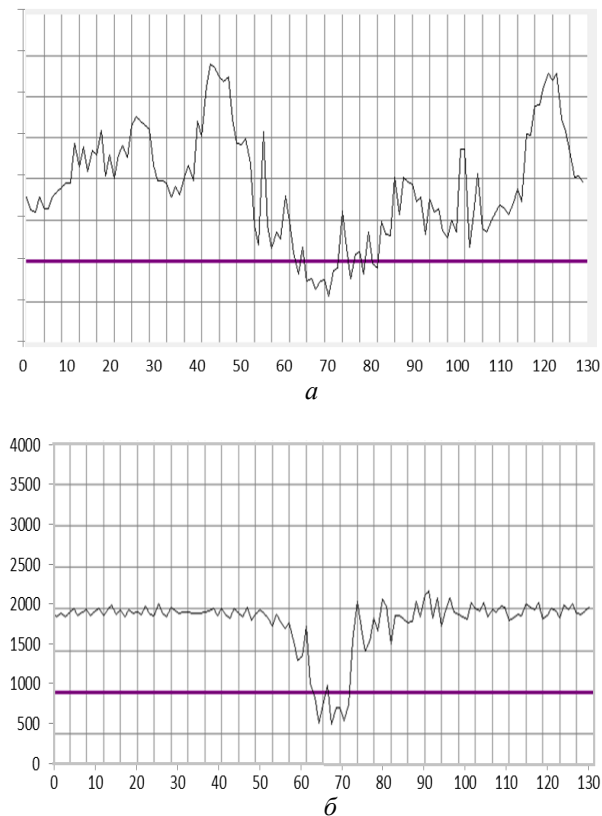


Рис. 9. Сигнал с ПЗС: а – от объекта;
б – от объекта с нормализацией

Fig. 9. Signal from CCD a) from object
b) from object with normalization

Таким образом, неравномерность яркости оптической системы компенсируется нормализацией сигнала с ПЗС.

Тарировка математической модели ОЦЭМ

Регулярная настройка (юстировка и тарировка) ОЦЭМ включает ряд этапов.

Установка лазерного плоскостного излучателя строго горизонтально (уровень) со строго вертикальной ориентацией плоскости (отвес).

Установка линзы Френеля строго вертикально (отвес) и по центру излучения в фокусе лазерного излучателя, на приемной стороне на листе бумаги должна быть лазерная полоса размером с линзу Френеля и параллельно ей.

Устанавливаем вторую линзу Френеля строго вертикально (отвес) и по центру лазерной полосы, а в ее предфокусе размещается вертикальная ПЗС-линейка с покрытием чувствительного элемента (ПЗС экранируется от посторонних засветок).

Запускаются электронные схемы управления и отображается оцифрованная АЦП МК-полоса с ПЗС-линейки.

Яркость полосы автоматически нормируется по длине линейки.

Используя, например, штангенциркуль, выставляем на нем с шагом 1 см значения измерителя и перекрываем им оптическую плоскость с упором.

Замеренные значения «тени» с ПЗС-линейки и установленные на штангенциркуле связываем регрессионными уравнениями – получаем математическую модель ОЦЭМ, компенсирующую нелинейные искажения оптической системы и ручной юстировки.

При испытании для оценки нелинейности замера координаты y по высоте зоны регистрации эталонный объект (выставляется штангенциркулем с упором) с точно измеренными пространственными координатами замерялись системой (табл. 8). Зона регистрации составила 8 см, были определены начальная координата засвета пикселей и конечная, после чего вычислялось среднее значение.

Таблица 8. Замеры координат по высоте зоны регистрации

Table 8. Measurement of coordinates by registration zone height

Расстояние, см	Начальная координата, у.е.	Конечная координата, у.е.	Среднее значение, у.е.	Разница с последующим, у.е.
16	2	3	2,5	9
17	10	13	11,5	13
18	24	25	24,5	5,5
19	28	32	30	13
20	39	47	43	12,5
21	50	61	55,5	19
22	66	83	74,5	21
23	88	103	95,5	18,5
24	111	117	114	

Чтобы избавиться от нелинейности замера, полученные координаты приводятся к эталонным регрессионным уравнением третьего порядка, которое показало наименьшую погрешность (Таблица 0.143 см):

$$ry_i = a_1 + a_2 y_i + a_3 y_i^2 + a_4 y_i^3, \quad (7)$$

где y_i – измеренная координата ПЗС, ry_i – вычисленная координата $a_1 = 15,62$; $a_2 = 0,126$; $a_3 = -0,0006786$; $a_4 = 0,000001847$.

В табл. 9 показана погрешность по каждому эталонному замеру при тарировке.

Таблица 9. Погрешности перевода координат регрессионными уравнениями

Table 9. Errors of coordinates translation by regression equations

Расстояние, см	Приведенное значение, см	Абсолютная погрешность, см	Относительная погрешность, %
16	15,931	0,069	0,43
17	16,982	0,018	0,11
18	18,327	0,327	1,78
19	18,839	0,161	0,85
20	19,93	0,07	0,35
21	20,838	0,162	0,78
22	22,004	0,004	0,02
23	23,073	0,073	0,32
24	23,901	0,099	0,41

Таким образом, настройка и испытания ОЦЭМ показали, что погрешность измерения координат существенно зависит от юстировки и качества оптической системы, но может быть компенсирована регрессионной математической моделью нелинейности.

Исследование макета

При испытаниях макета ОЦЭМ выявлены следующие проблемы:

Общедоступные тонкие линзы Френеля обладают повышенными погрешностями (низкий коэффициент прозрачности, неравномерность освещенности из-за неточных насечек, геометрические искажения, размер 13 см), пришлось заменить на более толстые и более прозрачные (но и размером 18 см).

Мощности общедоступного лазерного плоскостного излучателя (красного) не хватило для оптимальной освещенности ПЗС с учетом прозрачности линз Френеля, пришлось заменить на более мощный (зеленый, 1000 люкс).

Хотя по паспорту ПЗС-линейка работает на частоте до 8 МГц, реально, с учетом переходных процессов и завала чувствительности в конце строки, пришлось ввести дополнительные такты ожидания (28 вместо 2 по паспорту), что снизило эффективную частоту до 7 МГц (156 тактов на строку в 128 отсчетов вместо 129 тактов по паспорту), но этого хватило для контроля.

Неравномерность освещенности ПЗС компенсирована нормированием полученных значений яркости от координаты линейки.

Нелинейность полученных значений с ПЗС, связанная с неидеальностью оптической системы макета и ручной технологией ее юстировки, компенсируется регрессионными уравнениями на этапе тарировки (настройки) ОЦЭМ.

Таким образом, испытание макета ОЦЭМ показало возможность использования предложенной конструкции из общедоступных цифровых компонент для проведения измерений кучности стрелкового оружия и скорости объектов, но для большей надежности рекомендуется увеличить зону регистрации в 2–4 раза.

Выводы

Анализ разработки и исследования макета оптической цифровой сверхзвуковой мишени показал:

Возможно собрать сверхзвуковую мишень на базе цифровых общедоступных компонент с приемлемой точностью фиксации координат (и скорости), также обладающей возможностью физического масштабирования рабочей зоны, что способствует ее широкому использованию.

Благодаря математической модели координат на базе регрессионных уравнений получается компенсировать большинство погрешностей компонент мишени (особенно оптических), что снижает требования к ее обслуживанию.

Исследования точности и быстродействия цифровой мишени показали, что при ориентировочной цене в 15 тыс. руб мишень показывает практически инструментальную точность (Таблица 0,143 см) по

координатам, что позволяет ее использовать не только для оценки кучности стрельбы.

Таким образом, исходя из актуальности дальнейшей разработки и исследования электронных сверхзвуковых мишеней, предлагается базироваться на исследованных и испытанных цифровых общедоступных конструкциях и математических моделях, особенно благодаря высокой гибкости программного обеспечения, позволяющего в реальном времени оценивать кучность боя.

Библиографические ссылки

1. Афанасьев В. А., Коробейникова И. В., Коробейников В. В. Контроль изделий по кучности стрельбы методом последовательного анализа // Вестник КИГИТ. 2010. № 1 (10). С. 46–54. EDN: PLNHKX.
2. Марков Е. М., Вдовин А. Ю., Егоров С. Ф. Разработка модели дробовой осыпи для оценки равномерности с учетом параметров стрельбы // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2013. № 2. С. 103–105. EDN: QBIYCN.
3. Исследование возможности уменьшения погрешности световой мишени из-за нутации и прецессии пули / В. А. Афанасьев, В. С. Казаков, В. Е. Лялин, В. В. Коробейников // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 251–252. EDN: RUAIJZ.
4. Афанасьев В. А., Коробейникова И. В. Модели акустических мишеней для сверхзвуковых и дозвуковых скоростей движения пуль // Системная инженерия. 2015. № 1 (1). С. 53–64. EDN: UDVZIR.
5. Вдовин А. Ю., Сузлов С. В. Алгоритм идентификации расположения световых экранов на стрелковой трассе с помощью датчиков контактной блокировки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. Т. 18. № 3. С. 91–93. EDN: UHHNAN.
6. Вдовин А. Ю., Марков Е. М. Оптимизация положения световых экранов в системах определения скорости и баллистического коэффициента с использованием лазерного излучателя // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 3. С. 129–132. EDN: SNQYHB.
7. FreePatent (световой экран): сайт. URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2484414> (дата обращения: 04.04.2025).
8. Яндекс (доплер): сайт. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2715994C1_20200305 (дата обращения: 04.04.2025).
9. Яндекс (локатор): сайт. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2515580C1_20140510 (дата обращения: 04.04.2025).
10. Марков Е. М., Вдовин А. Ю. Разработка мобильной телевизионной системы для измерения параметров дробового выстрела на основе камеры видеонаблюдения // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 4. С. 121–123. EDN: TCSBTF.
11. 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. EDN: GHZTGH.
12. Писарев С. А., Чирков Д. В., Федорова Е. А. Анализ аберраций и способов минимизации их влияния на результаты исследований быстропотекающих динамических процессов с использованием видеокамеры высокоскоростной съемки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 6–15. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-6-15. EDN: QTPQAN.

13. Сравнительный анализ лазерного и радиолокационного методов измерения начальной скорости снаряда / В. А. Соловьев, С. С. Ярошук, А. В. Федотов, В. Е. Конохов // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула : 2019. № 9. С. 168–175. EDN: USYZSC.

14. Снигирев А. А., Вдовин А. Ю. Анализ современных автоматизированных систем оценки скорости метаемого снаряжения // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Ижевск, 26–27 мая 2022 года. Ижевск, 2022. С. 186–192. EDN: AWQGGG.

15. Исследование лазерных экранов электронных оптических мишеней / С. Ф. Егоров, А. Ю. Вдовин, Е. М. Марков, Т. Е. Шелковникова // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 4. С. 21–28. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-4-21-28. EDN: ZWLIEJ.

16. Азизов Д. И., Петухов К. Ю. Устройство с удаленным доступом для измерения характеристик линейного перемещения объекта на базе ПЗС-линейки // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 2020. С. 310–314. EDN: DPHLLG.

17. Исунов М. А., Егоров С. Ф., Шелковников Е. Ю. Оптическая система измерения параметров сверхзвуковых объектов // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. Молодежный научный форум. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 2023. С. 237–240. EDN: SIJVDV.

18. Документация на ПЗС-линейку TSL1401CL. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/624290/TAOS/TSL1401CL.html> (дата обращения 04.04.2025).

19. Документация на МК STM32F407VET6. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/486331/STMICROELECTRONICS/STM32F407xx.html> (дата обращения 04.04.2025).

20. Документация на ПЗС-линейку TSL1401CL. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/624290/TAOS/TSL1401CL.html> (дата обращения 04.04.2025).

21. Документация на МК STM32F407VET6. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/486331/STMICROELECTRONICS/STM32F407xx.html> (дата обращения 04.04.2025).

22. Там же.

References

1. Afanas'ev V.A., Korobeinikova I.V., Korobeinikov V.V. Kontrol' izdelii po kuchnosti strel'by metodom posledovatel'nogo analiza [Control of articles by accuracy of firing by method of sequential analysis]. Vestnik KIGIT, 2010, no. 1, pp. 46–54 (in Russ.). EDN: PLNHKX.

2. Markov E.M., Vdovin A.Yu., Egorov S.F. Razrabotka modeli drobovoi osypi dlya otsenki ravnomernosti s uchetom parametrov strel'by [Development of a shotshell model to assess uniformity taking into account firing parameters] Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2013, no. 2, pp. 103–105 (in Russ.). EDN: QBIYCN.

3. Afanas'ev V.A., Kazakov V.S., Lyalin V.E., Korobeinikov V.V. Issledovanie vozmozhnosti umen'sheniya pogreshnosti svetovoi misheni iz-za nutatsii i pretsessii puli [Study of the possibility of reducing the error of the light target due to nutation and precession of the bullet]. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo. 2013, vol. 2, pp. 251–252 (in Russ.). EDN: RUJIZ.

4. Afanas'ev V.A., Korobeinikova I.V. Modeli akusticheskikh mishenei dlya sverkhzvukovykh i dozvukovykh skorstei dvizheniya pul' [Acoustic target models for supersonic

and subsonic bullet speeds] Sistemnaya inzheneriya. 2015, no. 1, pp. 53–64 (in Russ.). EDN: UDVZIR.

5. Vdovin A.Yu., Suglov S.V. Algoritm identifikatsii raspolozheniya svetovykh ekranov na strelkovoi trasse s pomoshch'yu datchikov kontaktnoi blokirovki [Algorithm for identifying the location of light screens on the shooting track using contact lock sensors] Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 91–93 (in Russ.). EDN: UHHHAN.

6. Vdovin A.Yu., Markov E.M. Optimizatsiya polozheniya svetovykh ekranov v sistemakh opredeleniya skorsti i ballisticheskogo koeffitsienta s ispol'zovaniem lazernogo izluchatelya [Optimizing the Position of Light Screens in Velocity and Ballistic Coefficient Systems Using a Laser Emitter] Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2014, no. 3, pp. 129–132 (in Russ.). EDN: SNQYHB.

7. FreePatent (light screen): website. Available at: <https://www.freepatent.ru/patents/2484414> (date of circulation: 04.04.2025)

8. Yandex (doppler): website. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2715994C1_20200305 (date of circulation: 04.04.2025)

9. Yandex (locator): website. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2515580C1_20140510 (date of circulation: 04.04.2025)

10. Markov E.M., Vdovin A.Yu. Razrabotka mobil'noi televizionnoi sistemy dlya izmereniya parametrov drobovogo vystrela na osnove kamery videonablyudeniya [Development of a mobile television system for measuring the parameters of a shot boom based on a CCTV camera] Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2014, no. 4, pp. 121–123 (in Russ.). EDN: TCSBTF.

11. Chirkov D.V., Fedorova E.A. K voprosu opredeleniya kharakteristik dvizheniya ob"ekta na osnove vysokoskorostnoi videos"emki [On the issue of determining the characteristics of the movement of an object based on high-speed video shooting] 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. EDN: GHZTGH.

12. Pisarev S.A., Chirkov D.V., Fedorova E.A. Analiz aberratsii i sposobov minimizatsii ikh vliyaniya na rezul'taty issledovaniy bystroprotekayushchikh dinamicheskikh protsessov s ispol'zovaniem videokamery vysokoskorostnoi s"emki [Analysis of aberrations and ways to minimize their impact on the results of studies of fast dynamic processes using a high-speed video camera] Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–15 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-6-15. EDN: QTPOAN.

13. Solov'ev V.A., Yaroshchuk S.S., Fedotov A.V., Konokhov V.E. Sravnitel'nyi analiz lazernogo i radiolokatsionnogo metodov izmereniya nachal'noi skorsti snaryada [Comparative analysis of laser and radar methods for measuring the initial velocity of a projectile] Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Tula: 2019, no. 9, pp. 168–175. EDN: USYZSC.

14. Snigirev A.A., Vdovin A.Yu. Analiz sovremennykh avtomatizirovannykh sistem otsenki skorsti metaemogo snaryazheniya [Analysis of modern automated systems for estimating the speed of thrown equipment] Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii : sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Izhhevsk, 2022, pp. 186–192. EDN: AWQGGG.

15. Egorov S.F., Vdovin A.Yu., Markov E.M., Shelkovnikova T.E. Issledovanie lazernykh ekranov elektronnykh opticheskikh mishenei [Research of laser screens of electronic optical targets]. J. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 21–28 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2017-4-21-28. EDN: ZWLIEJ.

16. Azizov D.I., Petukhov K.Yu. Ustroistvo s udalennym dostupom dlya izmereniya kharakteristik lineinogo

peremeshcheniya ob"ekta na baze PZS-lineiki [Remote access device for measuring linear movement characteristics of an object based on a CCD ruler] Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Izhevsk, 2020. pp. 310-314 (in Russ.). EDN: DPHLLG.

17. Isupov M. A., Egorov S. F., Shelkovnikov E. Yu. Opticheskaya sistema izmereniya parametrov sverkhzvukovykh ob"ektov [Optical measurement system for supersonic objects] Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Molodezhnyi nauchnyi forum. Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Izhevsk, 2023. pp. 237-240 (in Russ.). EDN: SIJVDV.

18. Documentation for TSL1401CL. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/624290/TAOS/TSL1401CL.html> (date of circulation 04.04.2025).

19. Documentation for MK STM32F407VET6. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/486331/STMICROELECTRONICS/STM32F407xx.html> (date of circulation 04.04.2025).

20. Documentation for TSL1401CL. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/624290/TAOS/TSL1401CL.html> (date of circulation 04.04.2025).

21. Documentation for MK STM32F407VET6. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/486331/STMICROELECTRONICS/STM32F407xx.html> (date of circulation 04.04.2025).

22. Ibid.

* * *

Optical Digital Target Research Based on High-Speed CCD-range

A. I. Kirillov, PhD in Engineering; Research Associate, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

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

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

E. Yu. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

K. Yu. Petukhov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The relevance of the development and research is justified by the need to control the production of small arms, including the accuracy of firing. It is proposed to rely on digital targets based on publicly available components.

The requirements for optical digital electronic targets of three classes of purpose (supersonic, transonic and subsonic) are described, the structure is designed and standard optical and digital components for the target of supersonic small arms accuracy control are selected. The target operation principle is based on the intersection of the object and the optical plane with the creation of a "shadow" on a high-speed CCD-range and fixing its coordinates. As a result of research, the control unit of the high-speed CCD line was configured TSL1401CL based on the MCU STM32F4 (through direct memory access and three timers, as well as a cascade circuit for switching ADC units) on the target model (with the only coordinate). Normalization of data received from CCD due to uneven brightness of optical system is introduced. A mathematical model based on regression equations compensating non-linear distortions introduced by the target optical part is suggested. Procedure for alignment (adjustment of optical part) and calibration (adjustment of digital units) of the target is developed. Tests of the target model showed the possibility of application of the proposed design scheme based on publicly available optical and digital components with scaling capabilities. The error in coordinate determination was 0.143 cm (rms dev).

It is necessary to constantly expand the possibilities of production automation, increase the efficiency and safety of small arms control operations, reduce its cost, and, therefore, increase the competitiveness of electronic digital targets.

Keywords: CCD-range, Fresnel lens, microcontroller, normalization, error.

Получено: 03.05.25

Образец цитирования

А. И. Кириллов, С. Ф. Егоров, Ю. К. Шелковников, Е. Ю. Шелковников Исследование оптической цифровой мишени на базе высокоскоростной ПЗС-линейки // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 4. С. 22–32. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-22-32.

For Citation

Kirillov A.I., Egorov S.F., Shelkovnikov Yu.K., Shelkovnikov E.Yu., Syakterev V.N., Petukhov K.Yu. [Optical digital target research based on high-speed CCD-range]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 22-32 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-22-32.