

УДК 623.544:681.78

Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
 Н. И. Осипов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 С. Р. Кизнерцев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 Институт механики УрО РАН

СТРЕЛКОВЫЙ ТРЕНАЖЕР НА ОСНОВЕ ТЕЛЕВИЗИОННОГО СКАНИСТОРА

В статье рассмотрено применение телевизионного сканистора с П-образной формой фоточувствительной поверхности и Т-образной световой зоной лазерного излучателя в качестве датчика координат оптико-электронной мишени спортивного тренажера. Получено выражение для видеосигнала от Т-образного светового пятна на сканисторе, позволяющее по временным местоположениям видеосигналов от трех световых зон определять координаты лазерного луча в плоскости объекта-мишени, а также учитывать погрешность от «свала» учебного оружия на некоторый угол.

Ключевые слова: стрелковый тренажер, телевизионный сканистор, лазерный излучатель, световая зона, видеосигнал.

Малые габариты и вес телевизионного сканистора, его высокая надежность и хорошие метрологические характеристики, отсутствие механического контакта с объектом измерений, а также возможность применения оптической обработки измерительной информации позволяют широко использовать сканисторные преобразователи в качестве датчика систем автоматического контроля за пространственно-временным состоянием объекта [1, 2]. Сканистор применяется в различных отраслях промышленности [3–6] и в военной технике [7–11] для измерения угловых и линейных перемещений, скоростей, ускорений, размеров и взаимного положения объектов, обеспечивая при этом высокие метрологические характеристики [12–14]. Достоинством однострочного сканистора является то, что он может быть выполнен в виде любой конфигурации [15, 16], в частности, в виде буквы П. Если при этом использовать Т-образную световую зону излучателя, то в этом случае сканистор можно применять в качестве датчика координат оптико-электронной мишени спортивного тренажера.

На рис. 1 приведена структурная схема датчика координат стрелкового тренажера, рис. 2 иллюстрирует положение проекции светового луча Т-образной формы на фоточувствительной поверхности П-образного сканистора, на рис. 3 показаны временные диаграммы, поясняющие принцип его работы. На рисунках обозначены: 1 – учебное оружие; 2 – установленный на оружии лазерный излучатель; 3 – мишень; 4 – П-образный сканистор; 5 – блок выделения видеоимпульсов; 6 – микропроцессор; 7 – регистрирующее устройство.

Датчик координат стрелкового тренажера работает следующим образом. При наведении стрелком учебного оружия 1 в центр мишени 3 и нажатии на крючок спускового механизма блок выделения видеоимпульсов 5 включает лазерный излучатель 2 для проецирования светового пятна Т-образной формы на П-образный сканистор 4 (рис. 2) и пилообразное напряжение развертки, при этом на выходе блока 5 формируются коды измерительных видеоимпульсов.

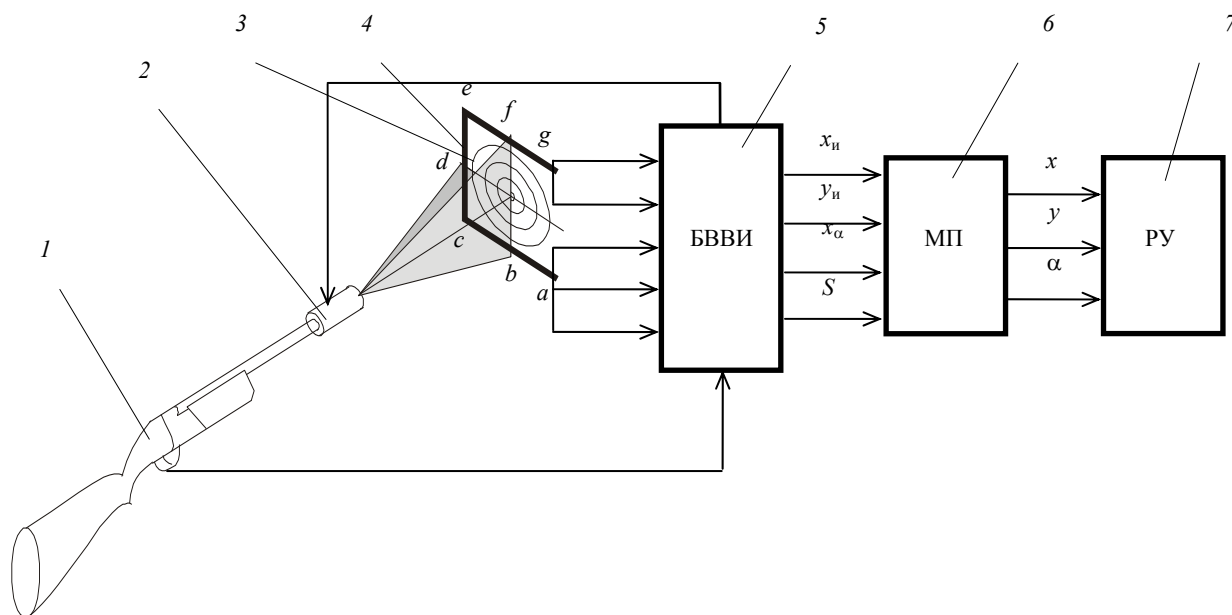


Рис. 1. Структурная схема датчика координат стрелкового тренажера

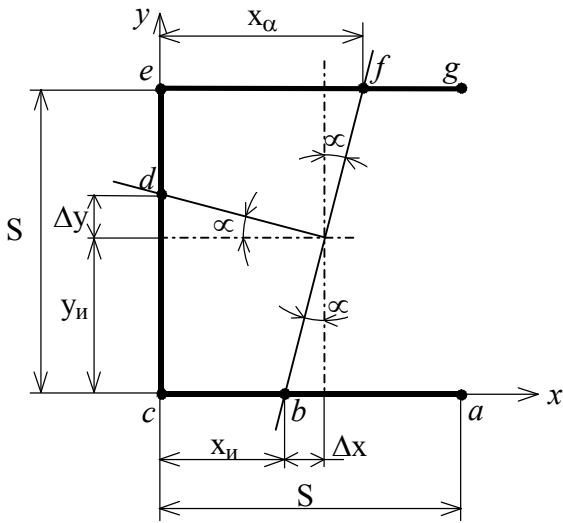


Рис. 2. Проекция светового луча Т-образной формы на поверхность П-образного сканистора

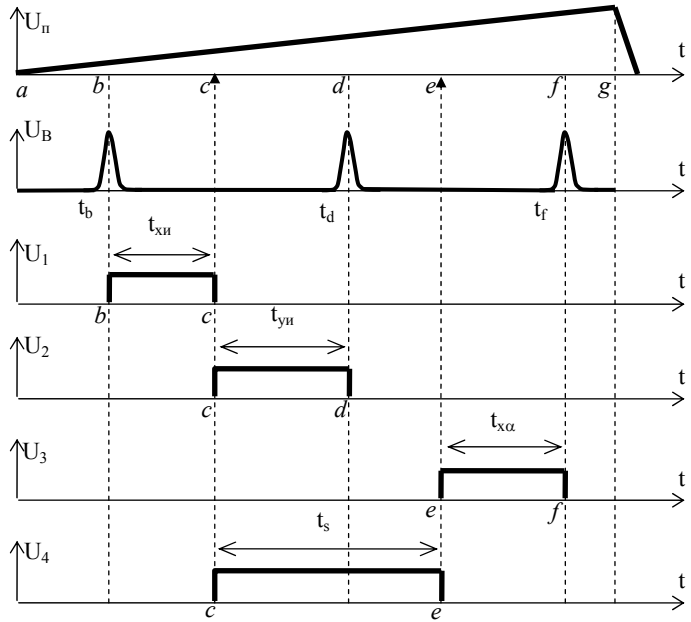


Рис. 3. Временные диаграммы работы П-образного сканистора

Рассмотрим определение местоположения световой зоны на сканисторе по максимуму видеосигнала. Для эквивалентной схемы сканистора (рис. 4) можно записать:

$$E_{30} = E_k + U_{3-6} + U_{6-k}; \quad (1)$$

$$j_{3-6} = j_s (e^{\alpha U_{3-6}} - 1) - j_{f1}; \quad (2)$$

$$j_{6-k} = -j_s (e^{\alpha U_{6-k}} - 1) - j_{f2}, \quad (3)$$

где $E_{30} = E_0 x_0 / l$ – потенциал эмиттера в точке опроса x_0 ; $E_k = E_0 t_0 / T$ – значение пилообразного напряжения в момент опроса t_0 ; U_{3-6} – напряжение на переходе эмиттер-база; U_{6-k} – напряжение на переходе база-коллектор; $\alpha = q / A \cdot KT$; A – коэффициент, отражающий степень «неидеальности» p - n -перехода; K – постоянная Больцмана; T – температура по Кельвину; q – заряд электрона; $j_{3-6} = j_{6-k} = j$ – плотность тока через фотодиодную ячейку; j_{f1} и j_{f2} – приращения плотностей токов насыщения фотодиода эмиттер-база и база-коллектор при освещении. Из уравнений (2) и (3) следует:

$$U_{3-6} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{j + j_s + j_{f1}}{j_s}; \quad (4)$$

$$U_{6-k} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{j_s + j_{f2} + j}{j_s}. \quad (5)$$

Подстановка (4), (5) в (1) и решение последнего относительно j дает выражение для тока через элементарную ячейку сканистора:

$$j = j_s \frac{\exp \alpha (E_3 - E_k) - 1}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} + j_{f1} \frac{\exp \alpha (E_3 - E_k)}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} - j_{f2} \frac{1}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1}. \quad (6)$$

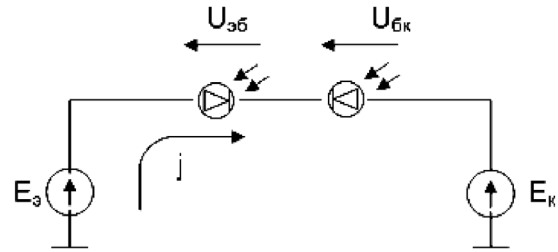


Рис. 4. Эквивалентная схема выделения видеосигнала со сканистора

Суммарный ток через сканистор:

$$J = b \int_0^l \left[j_s \frac{\exp \alpha (E_3 - E_k) - 1}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} + j_{f1} \frac{\exp \alpha (E_3 - E_k)}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} - j_{f2} \frac{1}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} \right] dx. \quad (7)$$

Видеосигнал со сканистора образуется при дифференцировании полного тока:

$$V = \frac{dJ}{dt} = \frac{2Lbl}{T} j_s \left[\frac{1}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} \right]_0^l + \frac{2Lbl}{T} j_f \left[\frac{1}{\exp \alpha (E_3 - E_k) + 1} \right]_{b-\Delta b}^{b+\Delta b}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2Lbl}{T} j_f \left[\frac{1}{\exp \alpha(E_s - E_k) + 1} \right]_{d-\Delta d}^{d+\Delta d} + \\
 & + \frac{2Lbl}{T} j_f \left[\frac{1}{\exp \alpha(E_s - E_k) + 1} \right]_{f-\Delta f}^{f+\Delta f}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где $j_{f1} = j_{f2} = j_f$; b – ширина сканистора; Δb , Δd , Δf – полуширина световых зон на сканисторе.

Из (8) следует, что амплитуда видеосигнала сканистора пропорциональна яркости световой зоны, а временной интервал от начала пилообразного напряжения до момента возникновения видеосигнала пропорционален расстоянию световой зоны от торца сканистора. Анализ выражения (8) показывает, что при увеличении ширины световой зоны на сканисторе до величины, соответствующей удвоенной зоне переключения фотодиодной ячейки $4U_0$, амплитуда видеосигнала нарастает, а его форма остается неиз-

менной. При дальнейшем увеличении ширины световой зоны амплитуда видеосигнала не меняется, а его форма из колоколообразной становится трапециевидной. Поэтому при определении координаты световой зоны по максимуму видеосигнала необходимо использовать узкую световую зону.

Рассмотрим работу П-образного сканистора более подробно. Длина фоточувствительной поверхности сканистора на внутренней П-образной стороне равна $3S = l$ (рис. 5), а на внешней $3S + 4b = l + 4b$. Поскольку сопротивление делительного слоя по длине сканистора изменяется равномерно, то напряжение смещения E_0 вдоль делительного слоя распределяется пропорционально его длине. Поэтому линии равного потенциала (ЛРП) эмиттера, расположенные у краев сканистора перпендикулярно его фоточувствительной поверхности, наклоняются и в местах «излома» буквы П имеют максимальный угол наклона 45° .

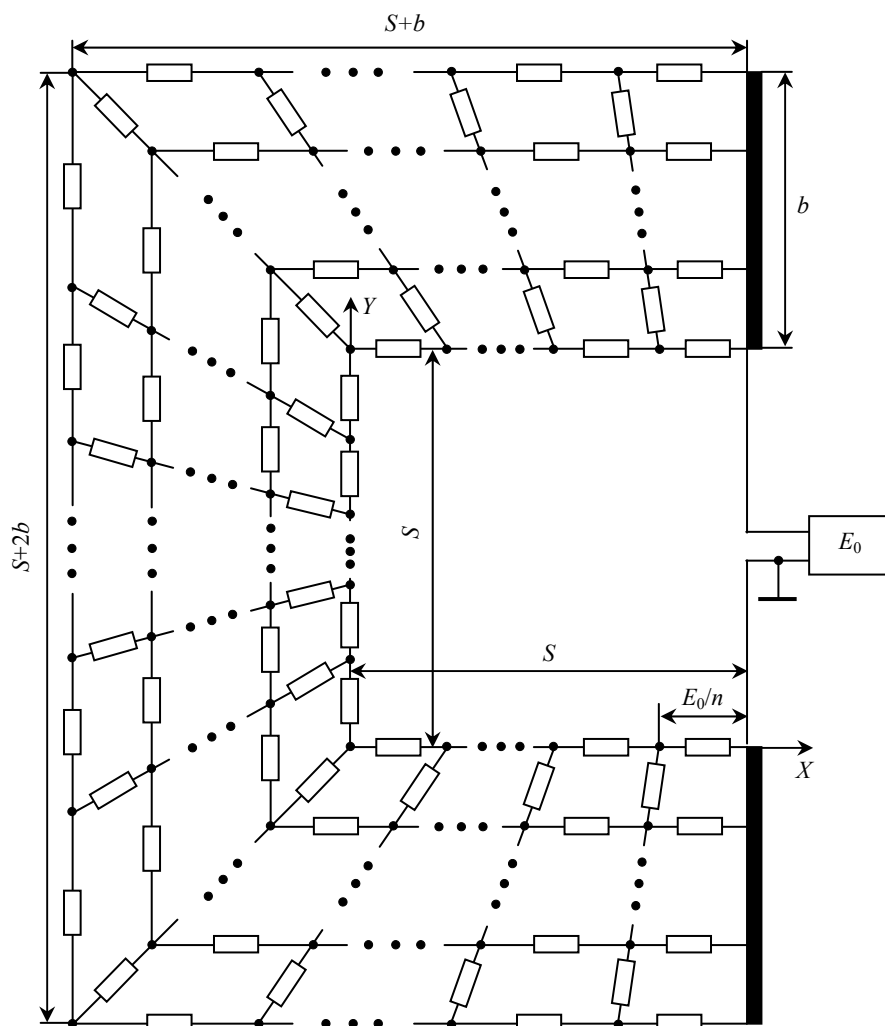


Рис. 5. Изменение угла наклона линии равного потенциала вдоль делительного слоя двухкоординатного сканистора

При опросе сканистора пилообразное напряжение линейно изменяется от 0 до E_0 , а граница нулевого напряжения смещается последовательно по линиям

равного потенциала по всей длине сканистора. По разные стороны от этой границы ток поперек сканисторной структуры течет в разных направлениях

и определяется сопротивлением (током насыщения) соответствующего *p-n*-перехода, включенного в за-порном направлении. Следует отметить, что Т-образная световая зона пересекает под прямым углом оси *X, Y* двухкоординатного сканистора, а момент максимума видеосигнала (момент равенства напряжений $E_x = E_0 x / l = E_k = E_0 t_x / T$ или $E_y = E_0 y / l = E_k = E_0 t_y / T$) соответствует пересече-нию ЛРП, находящейся под напряжением E_x (E_y), с осевой линией делительного (ОЛД) слоя (рис. 6, б).

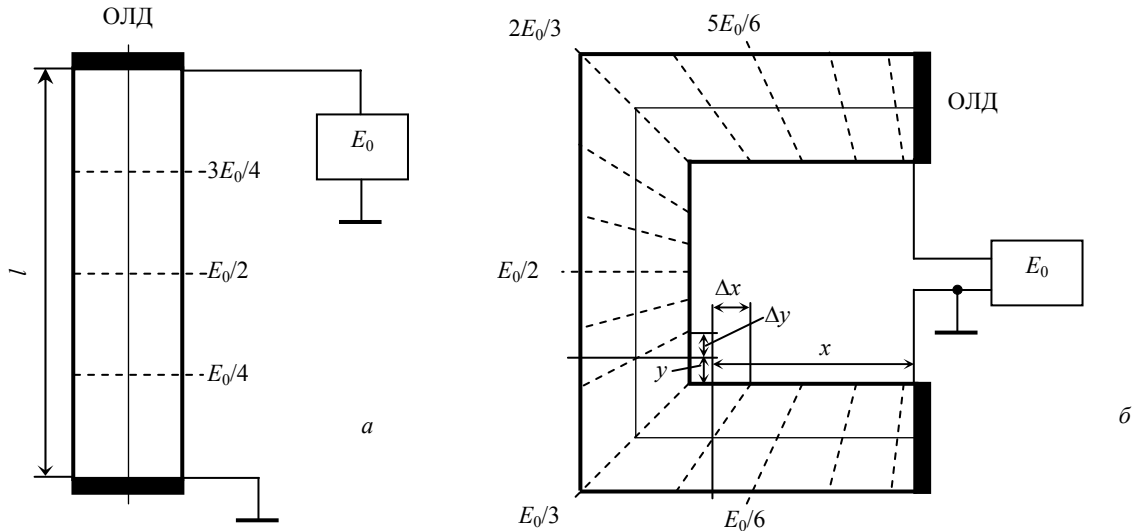


Рис. 6. Распределение потенциала на делительном слое: а – для однокоординатного сканистора; б – для двухкоординатного

Распределение напряжения на участке эмиттерного слоя от S до $S + S/2$ смещается сначала в сторону меньших значений и описывается выражением:

$$E_y = E_0 \frac{y}{l} + E_0 \left(\frac{l - 2y}{2l} \right) \cdot \left(\frac{b}{(l + b)} \right), \quad (10)$$

а на участке от $(S + S/2)$ до $2S$ – формулой (9). Это приводит к более раннему опросу сканистора по оси *X* на величину $\Delta t_x = t'_x - t_x = t_x b / l$ с ошибкой

$$\Delta x = x' - x = bx / l \quad (11)$$

и к задержке опроса по оси *Y* на величину $\Delta t_y = t'_y - t_y = (T - t_y) b / l$ с ошибкой

$$\Delta y = y' - y = b(l - y) / l. \quad (12)$$

Определение координат световых зон целесообразно производить по временным местоположениям максимумов видеосигнала от узких световых зон постоянной ширины Δx , соответствующих их серединам. Ширина Δx световых рисок выбирается из условия $\Delta x \leq 8u_0 L / E_0$.

Стабильность положения фронтов видеоимпульсов, соответствующих точкам *c, e* в сканисторе 4 (рис. 2, 3), определяется внутренним генератором пилообразного напряжения развертки блока 5. Фронты, соответствующие световым зонам и точкам

При этом возникают ошибки $\Delta x = x' - x$ и $\Delta y = y' - y$ определения координат световой зоны, которые объясняются тем, что при изготовлении сканистора в виде буквы П линейное координатно задающее распределение напряжения на участке эмиттерного слоя с координатами от 0 до S смещается в сторону больших значений и описывается формулой:

$$E_x = E_0 \frac{x}{l} + E_0 \frac{x}{l} \cdot \frac{b}{(l + b)}. \quad (9)$$

b, d, f, являются измерительными (подвижными). Длительности видеоимпульсов $t_{xн}$, $t_{yн}$, $t_{xсв}$, t_s (рис. 3) пропорциональны соответствующим длинам $x_{н}$, $y_{н}$, $x_{св}$, S фоточувствительной поверхности сканистора 4 согласно уравнению преобразования сканистора:

$$x_i = t_{xi} L / T, \quad (13)$$

где L, T – соответственно, длина сканистора и период его опроса; t_{xi} , x_i – длительность *i*-го видеоимпульса и пропорциональный ему участок длины сканистора.

При неправильном наведении стрелком учебного оружия 1 («свале» на угол α) появляется дополнительная погрешность $\Delta x, \Delta y$ (рис. 2), при этом истинные координаты x, y точки наведения вычисляются микропроцессором 6 по формулам:

$$x = \frac{x_n \cdot S^2 + y_n (x_\alpha - x_n) \cdot S}{(x_\alpha - x_n)^2 + S^2}; \quad (14)$$

$$y = \frac{y_n \cdot S^2 + x_n (x_\alpha - x_n) \cdot S}{(x_\alpha - x_n)^2 + S^2}. \quad (15)$$

При отсутствии «свала» учебного оружия l имеем $\alpha = 0$; $\Delta x = 0$; $\Delta y = 0$ и истинные координаты x, y точки наведения равны измеряемым координатам $x_{н}, y_{н}$: $x = x_{н}$; $y = y_{н}$.

Следует отметить, что предложенный датчик координат стрелкового оружия обладает простой кон-

струкцией, обеспечивает высокое быстродействие и точность измерения координат в тренажере для обучения приемам и навыкам стрельбы из спортивного оружия за счет использования П-образного сканистора (с погрешностью измерения не более 10 мкм) и коррекции координат точки попадания при свале учебного оружия. Применение однострочного сканистора с П-образной формой фоточувствительной поверхности и светового луча Т-образного сечения позволяет определять координаты объекта (в конкретном случае – точки прицеливания оружия) на плоскости. Точность определения координат лазерного луча в плоскости объекта-мишени ограничивается величиной нелинейности распределения потенциала вдоль делительного слоя сканистора.

Библиографические ссылки

1. Подласкин Б. Г., Гук Е. Г. Позиционно-чувствительный фотодетектор-мультискан // Измерительная техника. – 2005. – Т. 8. – С. 31–34.
2. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. Устройство для измерения размеров объектов // Патент РФ № 2348900. – 2009. – Бюл. № 7.
3. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения // Известия РАН. – 2005 (43). – № 2. – С. 71–75.
4. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Применение дискретно-сплошной структуры мультискана в оптико-электронных измерительных устройствах // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 46–49.
5. Шелковников Ю. К. Прецизионная информационно-измерительная система на основе телевизионного сканистора // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 1. – С. 244–249.
6. Шелковников Ю. К. Сканисторная информационно-измерительная система с адаптивным режимом сканирования // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 169–172.
7. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Алиев А. В., Сермягин К. В. Влияние физических особенностей телевизионной сканисторной структуры на точность измерения непрямолинейности ствольных труб // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2. – С. 112–117.
8. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Алиев А. В., Осипов Н. И. Помехозащищенный сканисторный измеритель угловых перемещений объектов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2. – С. 106–112.
9. Закаменных Л. Г., Алиев А. В., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Измерение дульных углов при определении динамического рассогласования выверенных осей ствола и прицела // Оборонная техника. – 2013. – № 9-10. – С. 119–127.
10. Закаменных Л. Г., Алиев А. В., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Измерения непрямолинейности оси ствола в бесстрельбовом методе определения углов вылета снарядов // Оборонная техника. – 2013. – № 9-10. – С. 111–119.
11. Шелковников Ю. К., Веркиенко А. Ю., Осипов Н. И., Подласкин Б. Г. Датчик координат стрелкового тренажер // Патент РФ №2151361. – Оpubл. 20.06.2000.
12. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Анализ работы мультискана с амплитудно-модулированными световыми потоками // Датчики и системы. – 2003. – № 10. – С. 12–16.
13. Шелковников Ю. К. Выделение видеосигнала с мультискана модуляцией развертывающего напряжения // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 107–112.
14. Шелковников Ю. К. Повышение стабильности и линейности координатной характеристики сканисторных информационно-измерительных систем // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 251–255.
15. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Технология изготовления эпитаксиальных сканисторных датчиков // Известия РАН. – 2005 (43). – № 2. – С. 75–79.
16. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 133 с.

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Chief Researcher, Institute of Mechanics, UB RAS

N. I. Osipov, PhD in Engineering, Senior Researcher, Institute of Mechanics, UB RAS

S. R. Kiznertsev, PhD in Engineering, Senior Researcher, Institute of Mechanics, UB RAS

Shooting simulator based on television scanistor

The paper describes application of the television scanistor with П-shape of photosensitive surface and T-shape of light zone of the laser emitter as the sensor for coordinates of optical electronic target of a sport trainer. The relation is obtained for the video signal from the T-shaped light spot on the scanistor. It allows determining the coordinates of the laser beam on the object-target plane according to time location of video signals from three light zones, and to account also the error of the training gun stall by a certain angle.

Keywords: small-arms trainer, television scanistor, laser emitter, light zone, video signal.

Получено: 09.04.15