

На правах рукописи



БУТРИМОВ Иван Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ
ПРИЦЕЛОВ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Айрапетян Валерик Сергеевич

Официальные оппоненты: **Нежевенко Евгений Семенович**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Федоров Сергей Юрьевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация – Новосибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», г. Новосибирск

Защита состоится: «20» декабря 2016 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.08 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на официальном сайте <http://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Виктория Викторовна Вихман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Опыт вооружённых конфликтов последнего времени наглядно показал необходимость технического перевооружения Российской Армии. Разработанные несколько десятилетий назад образцы вооружения и военной техники в условиях современного боя не способны в полной мере обеспечить выполнение боевых задач, в частности задач в отношении высокоточной снайперской стрельбы.

В связи с этим в настоящее время в вооружённых силах происходит постепенное замещение стрелкового оружия устаревшей конструкции современными образцами, обладающими более высокими тактико-техническими характеристиками (ТТХ). В свою очередь, для обеспечения заложенных в конструкцию стрелкового оружия заданных показателей назначения требуется наличие прицельной техники, обладающей соответствующими ТТХ. Ведущими отечественными производителями активно ведутся разработки прицельной техники для её использования в составе современного высокоточного снайперского оружия, что позволяет спрогнозировать появление в ближайшем будущем достаточно большого количества предложений опытных и серийных образцов стрелковых прицелов различных типов и принципов действия. Постановка новой продукции на производство, а также процесс её внедрения сопровождается значительным, по своему объёму, комплексом испытаний. Процесс всех этапов испытаний прицельной техники должен сопровождаться обязательным метрологическим контролем объектов испытания.

Ошибки, допущенные в ходе контроля характеристик прицелов, связанных с определением положения линии визирования, способны привести к неверным выводам в отношении результатов испытаний. Следовательно, имеется вероятность использования на практике прицельных устройств с погрешностями, фактические значения которых выходят за установленные пределы, что неминуемо приведёт к снижению показателей точности стрельбы. Снижение точности стрельбы, в свою очередь, ведёт в одних случаях к промаху, что является невыполнением поставленной огневой задачи, а в других случаях, например, при стрельбе по цели, удерживающей заложника, промах может иметь значительно более серьёзные последствия. Поэтому значение высокоточного контроля характеристик прицельной техники в ходе её испытаний переоценить невозможно. Применяемые до последнего времени методы и средства контроля характеристик современных прицелов не способны

в полной мере обеспечить выполнение возложенных задач с требуемыми показателями точности.

Целью диссертационной работы является повышение точности контроля характеристик прицельной техники, связанных с определением положения линии визирования с использованием высокоэффективного оптико-электронного комплекса и методов его применения.

Для достижения поставленной цели в ходе выполнения диссертации были поставлены **следующие задачи:**

- определить пределы допустимой погрешности измерений оптико-электронного комплекса;
- разработать схемотехнические решения оптико-электронного комплекса, обеспечивающие определение характеристик прицелов в соответствии с допустимой погрешностью;
- создать экспериментальный образец оптико-электронного комплекса для определения возможности его использования при решении задач, связанных с контролем положения линии визирования прицелов;
- разработать методы контроля характеристик прицельной техники, с использованием разработанного оптико-электронного комплекса;
- провести лабораторные и полигонные исследования оптико-электронного комплекса для определения достигнутых показателей точности и возможности его использования на практике.

Научная новизна

1 Разработаны функциональные схемы оптико-электронного комплекса, позволяющие снизить суммарную погрешность определения положения линии визирования прицельной техники в неавтоматизированном режиме по сравнению с известными техническими решениями в 7,5 раза. Достигнутое повышение точности обеспечивается применением измерительной системы на основе позиционно-чувствительного фотоприёмника и лазера, базируемого на внешнюю поверхность ствола стрелкового оружия, а также применением системы визуализации изображения, состоящей из окулярной телевизионной камеры и видеоконтрольного устройства. Разработанные схемы оптико-электронного комплекса защищены тремя патентами на изобретение: №№ 2535583, 2535584, 2536570.

2 Разработаны способы определения положения линии визирования, которые вследствие использования относительного принципа определения координат изображения прицельного знака с учётом фактического положения лазерного пятна в плоскостях соответствующих позиционно-чувствительных

фотоприёмников оптико-электронного комплекса, исключают влияние личной ошибки оператора на результат измерения и обеспечивают повышение точности измерений в автоматизированном режиме от 1,6 до 2,1 раза по сравнению с неавтоматизированным режимом работы оптико-электронного комплекса.

3 Предложены оригинальные методы контроля характеристик прицельной техники в ходе стрельбовых испытаний с использованием разработанного оптико-электронного комплекса, отличающиеся:

- отсутствием необходимости демонтажа прицела с оружия для его контроля и его последующей установки на оружие, что исключает погрешность при повторной установке прицела;

- применением окулярной телевизионной камеры совместно с видеоконтрольным устройством, обеспечивающих наблюдение совмещённого изображения прицельного и визирного знаков в увеличенном масштабе;

- возможностью осуществления автоматизированных измерений, исключаящих личную ошибку оператора, вследствие использования персонального компьютера или специализированного электронного вычислительного устройства;

- безопасностью для оператора и технического состояния стрелкового оружия, вследствие применения внешнего способа базирования лазера на стволе оружия.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке:

- вариантов и разновидностей новых оптико-электронных схем, обеспечивающих высокоточное определение характеристик прицельной техники в ходе её испытаний;

- способов определения координат прицельных знаков различных типов и конфигураций, образующих линию визирования, в системе координат, связанной с позиционно-чувствительным фотоприёмником оптико-электронного комплекса, и допускающих относительный принцип измерений, что исключает влияние личной ошибки оператора на результат измерения;

- методов контроля положения линии визирования прицельной техники, с использованием разработанного оптико-электронного комплекса.

Практическая значимость диссертации заключается в создании нового высокоэффективного оптико-электронного комплекса для автоматизированных и неавтоматизированных измерений, обеспечивающего высокоточное определение показателей качества прицельной техники в ходе её испытаний.

Разработанный оптико-электронный комплекс и методы измерения технических характеристик объектов испытаний востребованы учреждениями и

организациями, участвующими в разработке, испытаниях и в производстве прицельной техники для осуществления контроля её характеристик, что подтверждено актом внедрения в СФ ФКУ НПО «СТиС» МВД России и актами использования результатов диссертационной работы: в ОАО «ЦНИИ «Циклон» и в АО «Швабе – Оборона и Защита».

Методология и методы исследования

При разработке вариантов схем оптико-электронного комплекса для контроля положения линии визирования прицелов использовались известные методы композиции оптических систем, основанные на теоретических исследованиях и расчётах параметров оптико-электронной системы, с последующей апробацией полученных результатов на практике.

Положения, выносимые на защиту

1 Варианты функциональных схем оптико-электронного комплекса, содержащие измерительную систему на основе позиционно-чувствительного фотоприёмника и лазера, базирующегося на внешней поверхности ствола стрелкового оружия, а также систему визуализации изображения, обеспечивают измерение характеристик прицельной техники, связанных с определением положения линии визирования, с максимальной погрешностью не превосходящей 16".

2 Использование относительного принципа определения координат прицельного знака с учётом координат положения лазерного пятна, определённых в системах координат соответствующих позиционно-чувствительных фотоприёмников оптико-электронного комплекса, исключает влияние личной ошибки оператора на результат определения положения линии визирования контролируемого прицела и повышает точность измерений от 1,6 до 2,1 раза.

3 Методы контроля характеристик прицельной техники, основанные на использовании разработанного оптико-электронного комплекса и отличающиеся возможностью автоматизации процесса измерения, отсутствием необходимости демонтажа прицела с оружия в процессе его контроля, применением системы визуализации изображения, обеспечивают измерение характеристик прицельной техники, связанных с определением положения линии визирования, с погрешностью в 7,5 – 16 раз меньшей, чем при использовании технических средств и методов, используемых на практике ранее.

Степень достоверности и апробация результатов

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России, получено 3 патента на изобретение и патент на полезную модель.

Основные положения и результаты научного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных форумах, конференциях и конгрессах: I-ом Международном форуме «Лазерполитех-2005», г. Новосибирск, Международных научных конгрессах «Гео-Сибирь», «Интерэкспо Гео-Сибирь» (2009, 2013 – 2015, г. Новосибирск), научно-практической конференции МВД России «Интреполитех-2014», г. Москва.

Оптико-электронный комплекс, разработанный и исследованный в рамках диссертационной работы, прошел в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Новосибирской области» метрологическую калибровку (сертификат №003669 от 20.05.2014).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 52 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации – 149 страниц, в том числе рисунков и схем – 43, таблиц – 20.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации отражены актуальность темы исследования, цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе приводится аналитический обзор технических средств и методов контроля параметров прицельной техники, используемых на практике: стенда на основе контрольно-юстировочного прибора АЛ2.766.747, изделий: ТХП, 1П61, ЛПУ, а также проверочной стрельбы. Основное внимание уделено расчётам точности по определению погрешности положения линии визирования, являющейся основной метрологической характеристикой контрольно-измерительных средств данного типа, а также выявлению особенностей практического применения рассматриваемых технических средств и методов, что является основой для формирования требований к новому оптико-электронному комплексу, предназначенному для высокоточного контроля характеристик современной прицельной техники в ходе её испытаний.

На основании проведённого аналитического обзора технических средств и методов, используемых для контроля положения линии визирования прицелов, сделаны следующие выводы.

1 Имеет место значительная погрешность контроля характеристик, связанных с определением положения линии визирования, составляющая 1,0' – 1,3' в сравнении с допускаемым отклонением положения линии визирования прицелов, используемых совместно со снайперским оружием, составляющим 54".

2 Необходимость для контроля положения линии визирования осуществлять демонтаж либо самого контролируемого прицела с посадочного места оружия, либо осуществлять установку контрольно-измерительного устройства в ствол оружия, что в том и другом случае приводит к возникновению погрешностей при повторной установке, существенно влияющих на суммарную погрешность измерения.

3 Затруднения при реализации функции самодиагностики большинства рассмотренных контрольно-измерительных устройств, т.к. диагностические приборы в составе известных контрольно-измерительных средств сами способны вызывать погрешности при их повторной установке.

4 Для устройств, использующих внутреннюю поверхность канала ствола для базирования контрольно-измерительных средств, имеется зависимость точности измерений от состояния ствола, его температуры, а также имеет место риск повреждения внутренней поверхности канала ствола и возможность осуществления выстрела при установленном в ствол контрольном устройстве.

5 Для устройств, использующих в качестве визирного знака удалённую точку, имеет место сложность организации проверки, заключающаяся в необходимости изготовления специальных выверочных мишеней, а также в обеспечении мер безопасности протяжённого участка, находящегося в непосредственной близости от направления стрельбы.

6 Ограниченная разрешающая способность измерительных систем известных контрольно-измерительных средств стрелковых прицелов, которая приводит к снижению точности измерений.

7 Для метода, основанного на использовании проверочной стрельбы результат во многом зависит от квалификации стрелка-испытателя, характеристик кучности стрелкового оружия, в составе которого производится проверка прицела, характеристик боеприпасов и условий стрельбы, в которых осуществляется стрельбовая проверка.

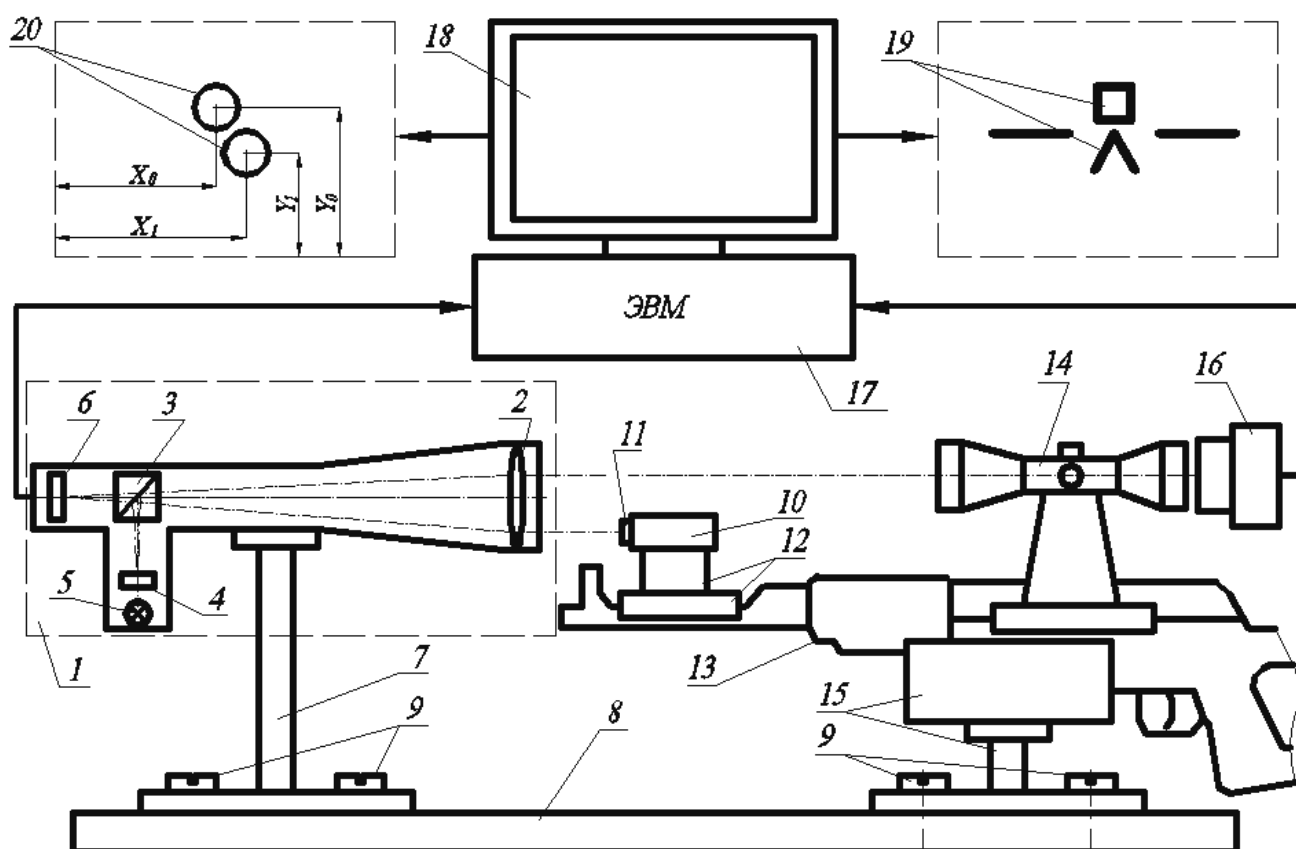
8 Для всех методов контроля характеристик прицельной техники,

используемых на практике, присутствует субъективная ошибка оператора, существенно влияющая на результат выполнения проверки.

Во втором разделе рассматриваются вопросы оценки границ допустимой погрешности контрольно-измерительных средств, в зависимости от допустимого значения отклонения положения линии визирования прицельных устройств. В соответствии с требованиями РМГ-63 и допустимым отклонением линии визирования прицелов, максимальное значение допустимой погрешности контрольно-измерительных средств не должно превышать следующих пределов:

$$(\delta_{КИС})_{\max} \leq (10'' \div 16''). \quad (1)$$

Пример функциональной схемы устройства, предназначенного для контроля характеристик прицелов при стрельбовых испытаниях приведён на рисунке 1.



1 – коллимационно-измерительный блок, 2 – объектив, 3 – светоделительный кубик, 4 – сетка, 5 – осветительная система, 6 – фотоприёмное устройство, 7 – опора, 8 – основание, 9 – винты, 10 – лазер, 11 – светофильтр, 12 – кронштейн, 13 – оружие, 14 – прицел, 15 – опора оружия, 16 – телевизионная камера, 17 – ЭВМ, 18 – монитор, 19 – изображение визирного и прицельного знаков, 20 – изображение лазерного пятна

Рисунок 1 – Схема оптико-электронного комплекса для контроля положения линии визирования прицелов в составе стрелкового оружия

Сущность способа, реализованного на основе оптико-электронного комплекса, заключается в высокоточном определении координат лазерного луча,

однозначно связанного с базовыми элементами стрелкового оружия, относительно линии визирования контролируемого прицельного устройства, до этапа испытаний и после него. Алгебраическая разность одноимённых координат оси лазерного луча до этапа испытаний и после, определит величину пропорциональную отклонению линии визирования контролируемого прицельного устройства в соответствующем координатном направлении после очередного этапа испытаний.

Контроль положения линии визирования прицелов на стрелковом оружии с использованием оптико-электронного комплекса осуществляется следующим образом. Оружие 13 с закреплённым на нем прицелом 14 устанавливается на регулируемую опору 15 и закрепляется в ней при помощи соответствующих зажимных устройств. На внешней поверхности ствола оружия 13 базируется лазер 10. С помощью регулировочных элементов опоры 15 производится наведение прицельного знака контролируемого прицела 14 в контрольную точку сетки 4 коллимационно-измерительного блока 1. Совмещённое изображение сетки 4 и прицельного знака контролируемого прицела 14 фиксируется телевизионной камерой 16 и передается в ЭВМ 17, с одновременным отображением их изображения на мониторе 18. Включается питание лазера 10, лазерный луч попадает на позиционно-чувствительное фотоприёмное устройство 6 коллимационно-измерительного блока 1. Изображение лазерного пятна фиксируется в запоминающем устройстве ЭВМ 17, где производится высокоточное определение координат лазерного пятна $(X_0; Y_0)$. После расчёта координат лазерного пятна лазер 10 снимается с оружия 13, оружие снимается с опоры 15 и производится этап стрельбовых испытаний. По окончании стрельбы оружие 14 вновь устанавливается на опору 15, лазер 10 вновь базируется относительно канала ствола оружия 13, производится повторная наводка оружия 13 с прицелом 14 в визирный знак сетки 4 и определяются координаты изображения лазерного пятна $(X_i; Y_i)$, соответствующие текущему положению линии визирования контролируемого прицела. Алгебраическая разность одноимённых координат лазерного пятна до этапа стрельбовых испытаний $(X_0; Y_0)$ и после – $(X_i; Y_i)$, определит величину пропорциональную отклонению линии визирования контролируемого прицельного устройства в соответствующем координатном направлении после очередного этапа стрельбовых испытаний.

Суммарная погрешность измерения при использовании оптико-электронного комплекса с прямым излучением лазера в неавтоматизированном режиме в ходе стрельбовых проверок определится из выражения:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{СТР} &= \sqrt{(\Delta\alpha_{Баз})^2 + (\Delta\alpha_{ЛП})^2 + (\Delta\alpha_{Рас})^2 + (\Delta\alpha_{ПЗ})^2} = \\ &= \sqrt{(1,5'')^2 + (1'')^2 + (1,6'')^2 + (6'')^2} = 6,5'', \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\alpha_{Баз}$ – погрешность положения оси лазерного луча вследствие неоднозначности базирования лазера, $\Delta\alpha_{ЛП}$ – погрешность определения координат центра лазерного пятна в плоскости позиционно-чувствительного фотоприёмника, $\Delta\alpha_{Рас}$ – погрешность, вызванная смещением изображения лазерного пятна из-за влияния расфокусировки приёмного объектива, $\Delta\alpha_{ПЗ}$ – погрешность совмещения прицельного знака с контрольной точкой.

Учитывая, что результат измерения углового смещения линии визирования образуется путём двукратного определения положения линии визирования, до выполнения стрельбовой проверки $(\Delta\alpha_{СТР})_q$ и после – $(\Delta\alpha_{СТР})_{q+1}$, то результирующая погрешность составит:

$$(\Delta\alpha_{СТР})_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta\alpha_{СТР})_q^2 + (\Delta\alpha_{СТР})_{q+1}^2} = 6,5'' \cdot \sqrt{2} = 9,2'', \quad (3)$$

На основе анализа принципа действия разработанного оптико-электронного комплекса, метода его применения, результатов расчёта погрешности можно сформулировать следующие его особенности:

- погрешность определения положения линии визирования для оптических прицелов с видимым увеличением более четырёх крат составляет менее 10'';

- отсутствует необходимость снятия и повторной установки прицела на посадочное место оружия в ходе его контроля, что не потребует повторного приведения оружия к нормальному бою совместно с контролируемым прицелом;

- отсутствует необходимость размещения в стволе оружия каких-либо фиксирующих или измерительных устройств, что повышает уровень пассивной безопасности при проведении стрельбовых испытаний и исключает риски повреждения канала ствола;

- использование ЭВМ предоставляет возможность автоматизировать процесс вычисления и сохранить результаты измерений для дальнейшего анализа.

В качестве недостатка можно отметить существенную погрешность совмещения прицельного знака с контрольной точкой, что позволяет обеспечить соответствие допускаемому значению погрешности определения положения линии визирования без существенного метрологического запаса.

В третьем разделе рассмотрена возможность автоматизированного определения координат линии визирования, что позволяет исключить влияние личной ошибки оператора и дополнительно повысить точность производимых измерений.

Сущность автоматизированного способа определения координат линии визирования заключается в определении величины смещения изображения прицельного знака относительно изображения визирного знака коллимационного канала в плоскости позиционно-чувствительного фотоприёмника окулярной телевизионной камеры, с учётом координат лазерного пятна в системе координат позиционно-чувствительного фотоприёмника коллимационно-измерительного блока.

Сформулированный выше способ определения координат прицельного знака по своему принципу является относительным – относительно визирного знака с учётом фактического положения лазерного пятна, и поэтому, при автоматизации процесса измерения, предоставляет возможность производить измерения без влияния личной ошибки оператора. Кроме этого, данный способ обеспечивает возможность размещения окулярной телевизионной камеры без её жёсткой фиксации относительно коллимационно-измерительного блока и контролируемого прицела, что также повышает точность измерений.

Для обоснования изложенных выше положений на рисунке 2 представлена схема, иллюстрирующая принцип автоматизированного определения координат прицельного знака типа «угольник».

На рисунке 2 схематически изображены: позиционно-чувствительный фотоприёмник 1 коллимационно-измерительного блока, состоящий из $M_1 \times N_1$ фоточувствительных элементов 2, лазерное пятно 3 с координатами $X_{ЛП}$, $Y_{ЛП}$, позиционно-чувствительный фотоприёмник 4 окулярной телевизионной камеры, состоящий из $M_2 \times N_2$ фоточувствительных элементов 5, изображение визирного знака коллимационного канала в виде четырёхугольника 6 с геометрическим центром – контрольной точкой 7, имеющим координаты $X_{КТ}$, $Y_{КТ}$, изображение прицельного знака 8 с геометрическим центром 9, имеющим координаты $X_{ПЗ}$, $Y_{ПЗ}$.

На рисунке 2 (а) показано, что прицельный знак и окулярная телевизионная камера смещены вправо относительно номинального положения. На рисунке 2 (б) показаны те же элементы, но при смещённом влево положении прицельного знака и окулярной телевизионной камеры, что одновременно иллюстрирует ошибку наведения оператора и смещение окулярной телевизионной камеры.

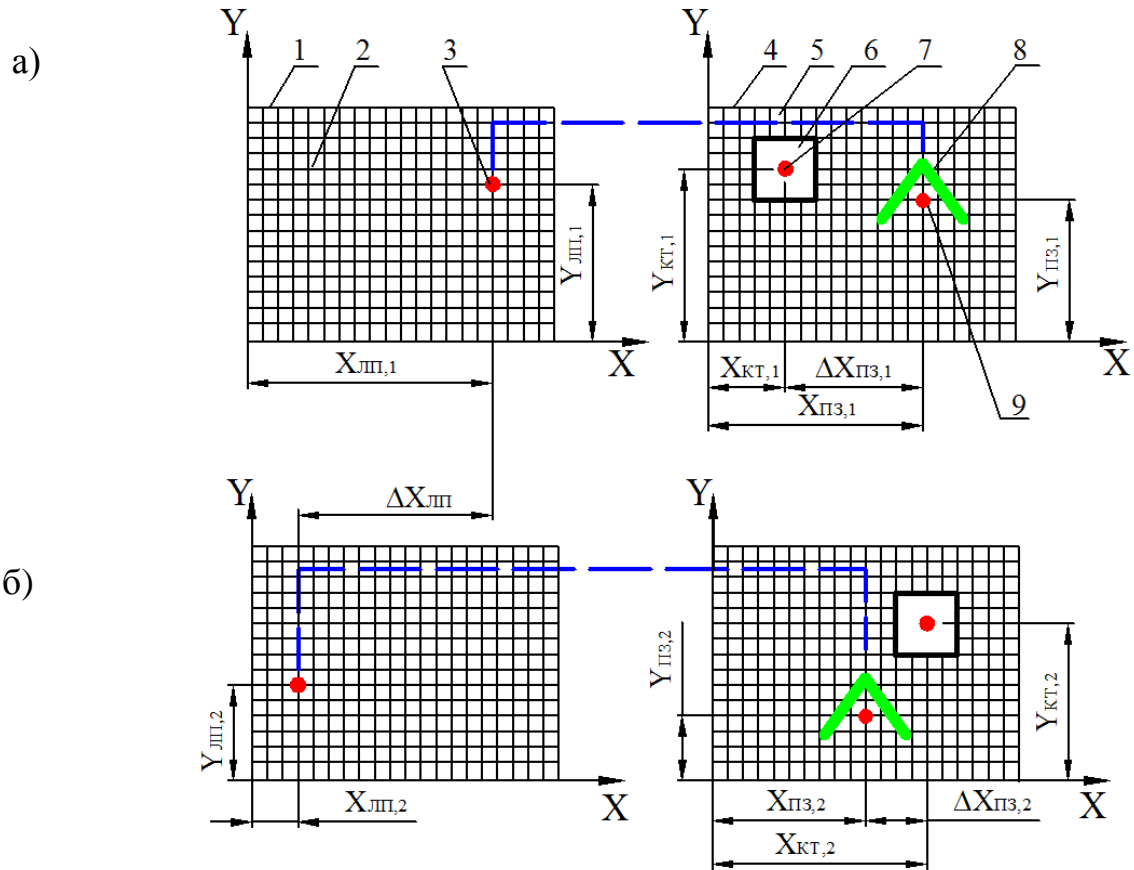


Рисунок 2 – Схема определения координат прицельного знака при автоматизированных измерениях

Пользуясь рисунком 2 можно записать выражение, определяющее отклонение прицельного знака между первым и вторым циклами измерений в горизонтальном направлении:

$$\Delta X_{1-2} = (X_{пз,1} - X_{кт,1} - X_{лп,1}) - (X_{пз,2} - X_{кт,2} - X_{лп,2}), \quad (4)$$

где $X_{пз,1}$, $X_{пз,2}$ – координаты изображения прицельного знака в горизонтальном направлении при его, соответственно, первом и втором наведении в контрольную точку коллимационного канала; $X_{кт,1}$, $X_{кт,2}$ – координаты контрольной точки коллимационного канала в горизонтальном направлении при, соответственно, первом и втором наведении прицельного знака; $X_{лп,1}$, $X_{лп,2}$ – координаты лазерного пятна в горизонтальном направлении при, соответственно, первом и втором наведении прицельного знака.

По аналогии можно записать выражение, определяющее отклонение прицельного знака в вертикальном направлении:

$$\Delta Y_{1-2} = (Y_{пз,1} - Y_{кт,1} - Y_{лп,1}) - (Y_{пз,2} - Y_{кт,2} - Y_{лп,2}). \quad (5)$$

Учитывая формулы (4) и (5), а также принимая во внимание угловое увеличение контролируемого прицела и принцип преобразования линейных величин в угловые, угол в горизонтальной плоскости между линией визирования

контролируемого прицела и осью лазерного луча при q -ом цикле измерения определится на основе следующей формулы:

$$\alpha_{X,q} = \arctg \left[\left(\frac{a_{ок}}{f'_{ок} \cdot \gamma} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ПЗ,i} - X_{КТ,i})}{n} \right) \right] - \arctg \left[\left(\frac{a_{колл}}{f'_{колл}} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ЛП,i})}{n} \right) \right], \quad (6)$$

где $a_{ок}$ – размер элемента позиционно-чувствительного фотоприёмника окулярной телевизионной камеры; $f'_{ок}$ – фокусное расстояние объектива телевизионной камеры, установленной со стороны окуляра контролируемого прицела; γ – угловое увеличение контролируемого прицела; $X_{ПЗ,i}$ – координата геометрического центра изображения прицельного знака в горизонтальной плоскости при i – ом измерении; $X_{КТ,i}$ – координата геометрического центра контрольной точки коллимационного канала в горизонтальной плоскости при i – ом измерении; $X_{ЛП,i}$ – координата геометрического центра лазерного пятна в горизонтальной плоскости при i – ом измерении; $a_{колл}$ – размер элемента позиционно-чувствительного фотоприёмника коллимационного канала; $f'_{колл}$ – фокусное расстояние объектива коллимационного канала; n – количество измерений в q -ом цикле.

Аналогичным образом определяется угол между осью лазерного луча и линией визирования контролируемого прицела в вертикальной плоскости при q -ом цикле измерения:

$$\alpha_{Y,q} = \arctg \left[\left(\frac{a_{ок}}{f'_{ок} \cdot \gamma} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ПЗ,i} - Y_{КТ,i})}{n} \right) \right] - \arctg \left[\left(\frac{a_{колл}}{f'_{колл}} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ЛП,i})}{n} \right) \right]. \quad (7)$$

Таким образом, произведя q -ый и $(q+1)$ -ый циклы измерения можно получить величины отклонения линии визирования контролируемого прицела в двух координатных направлениях:

$$\alpha_X = \alpha_{X,q+1} - \alpha_{X,q}; \quad \alpha_Y = \alpha_{Y,q+1} - \alpha_{Y,q} \quad (8)$$

Суммарное отклонение линии визирования определится из выражения:

$$\alpha_{\Sigma} = \sqrt{(\alpha_X)^2 + (\alpha_Y)^2}. \quad (9)$$

Формулы (6) и (7) определяют зависимость между смещением линии визирования и координатами прицельного знака типа «угольник», контрольной точки, лазерного пятна с исключением влияния личной ошибки наведения

оператора на результат измерения.

Из формул (6) и (7) следует, что определение величины смещения линии визирования осуществляется косвенно, посредством измерений координат прицельного знака контролируемого прицела, контрольной точки визирного знака и лазерного пятна, связанных между собой функциональной зависимостью. В этом случае погрешность измерения угла между линией визирования и осью лазерного луча в горизонтальной плоскости определится из формулы:

$$\Delta\alpha_X = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{ПЗ}}\right)^2 \cdot (\Delta X_{ПЗ})^2 + \left(\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{КТ}}\right)^2 \cdot (\Delta X_{КТ})^2 + \left(\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{ЛП}}\right)^2 \cdot (\Delta X_{ЛП})^2}, \quad (10)$$

где $\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{ПЗ}}$, $\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{КТ}}$, $\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{ЛП}}$ – частные производные от функции $\alpha_X = f(X_{ПЗ}, X_{КТ}, X_{ЛП})$, соответственно, по переменным координатам $X_{ПЗ}$, $X_{КТ}$, $X_{ЛП}$; $\Delta X_{ПЗ}$, $\Delta X_{КТ}$, $\Delta X_{ЛП}$ – погрешности определения координат, соответственно, прицельного знака, контрольной точки визирного знака и лазерного пятна.

Используя методы нахождения производных получены выражения для частных производных от функции (6), подставляя в которые данные, определённые в ходе нормировки, получены следующие значения частных ошибок:

$$\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{ПЗ}} = \frac{a_{ок}}{f'_{ок} \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{a_{ок}}{f'_{ок} \cdot \gamma} \cdot (\bar{X}_{ПЗ} - \bar{X}_{КТ})\right)^2} = \frac{0,002}{100 \cdot 5} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{0,002}{100 \cdot 5} \cdot 7\right)^2} = 4 \cdot 10^{-6}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{КТ}} = \frac{a_{ок}}{f'_{ок} \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{a_{ок}}{f'_{ок} \cdot \gamma} \cdot (\bar{X}_{ПЗ} - \bar{X}_{КТ})\right)^2} = \frac{0,002}{100 \cdot 5} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{0,002}{100 \cdot 5} \cdot 7\right)^2} = 4 \cdot 10^{-6}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial\alpha_X}{\partial X_{ЛП}} = \frac{a_{колл}}{f'_{колл}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{a_{колл}}{f'_{колл}} \cdot \bar{X}_{ЛП}\right)^2} = \frac{0,002}{500} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{0,002}{500} \cdot 500\right)^2} = 4 \cdot 10^{-6}. \quad (13)$$

Погрешность измерения углового положения линии визирования в горизонтальной плоскости в соответствии с (10) определится из выражения:

$$(\Delta\alpha_X)_{СТР} = \sqrt{(4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1^2 + (4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1^2 + (4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 3^2} = 1,32 \cdot 10^{-5} (рад) = 2,7''. \quad (14)$$

Суммарная погрешность углового положения линии визирования в произвольном направлении определится по формуле геометрического суммирования погрешностей:

$$(\Delta\alpha)_{СТР} = \sqrt{(\Delta\alpha_x)_{СТР}^2 + (\Delta\alpha_y)_{СТР}^2} = 2,7'' \cdot \sqrt{2} = 3,8'' . \quad (15)$$

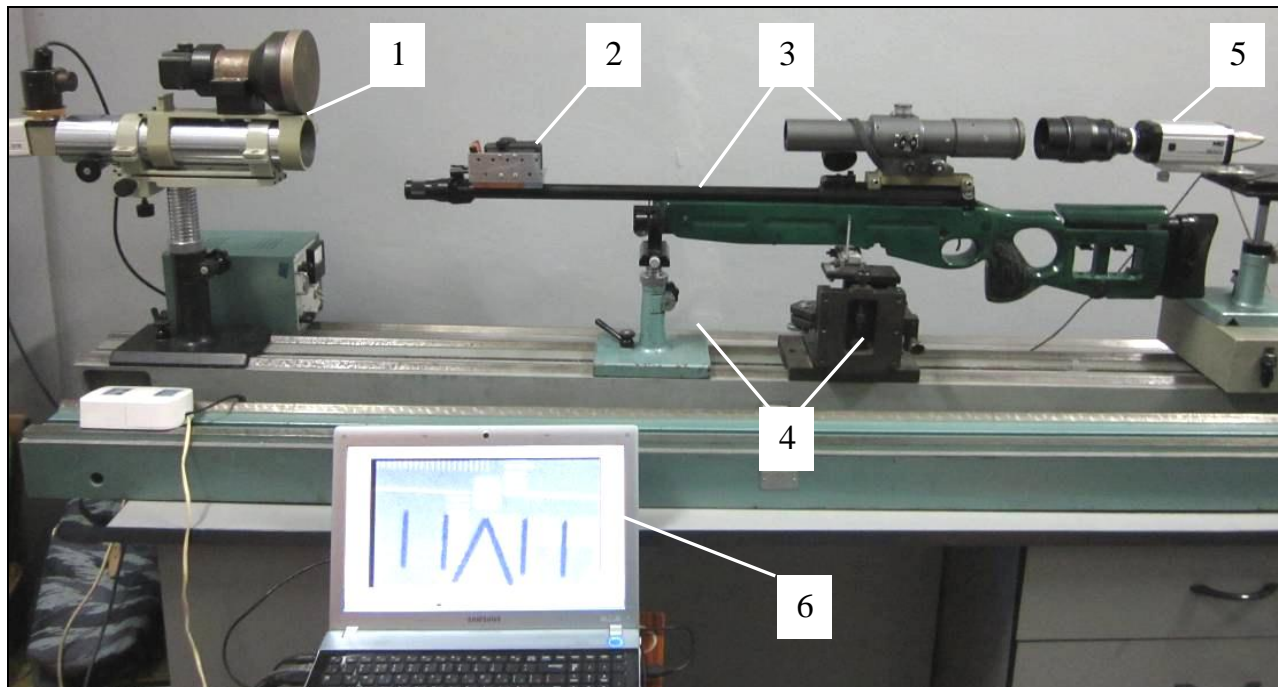
Учитывая, что результат измерения углового смещения линии визирования образуется путём двукратного измерения её углового положения, до выполнения стрельбовой проверки и после, то результирующая погрешность определится из следующего выражения:

$$(\Delta\alpha_\Sigma)_{СТР} = \sqrt{(\Delta\alpha)_{СТР,q}^2 + (\Delta\alpha)_{СТР,q+1}^2} = 3,8'' \cdot \sqrt{2} = 5,4'' . \quad (16)$$

Расчёты точности, проведённые в ходе диссертационной работы, показали, что использование автоматизированного метода контроля положения линии визирования прицелов позволяет уменьшить погрешность измерений в 1,6 – 2,1 раза, в зависимости от типа используемой схемы, по сравнению с неавтоматизированным способом.

В четвёртом разделе рассматривается практическая реализация схмотехнических решений, разработанных и исследованных в разделах 2 и 3 диссертации, в виде экспериментального образца опико-электронного комплекса, предназначенного для контроля положения линии визирования стрелковых прицелов в ходе их испытаний.

Внешний вид опико-электронного комплекса представлен на рисунке 3.



1 – коллимационно-измерительный блок, 2 – лазер, 3 – винтовка СВ-98 с контролируемым прицелом, 4 – опоры для установки оружия, 5 – окулярная телевизионная камера, 6 – ЭВМ

Рисунок 3 – Опико-электронный комплекс для контроля положения линии визирования

В результате практических исследований экспериментального образца оптико-электронного комплекса сделаны следующие выводы:

- подтверждены результаты теоретических исследований, проведённых в разделах 2 и 3, в частности определены значения: цены деления отсчётной системы коллимационно-измерительного блока – $0,9''$, диапазона его измерения – $23'47'' \times 17'30''$, погрешности измерения координат линии визирования контролируемого прицела, составляющей от $7,90''$ до $0,66''$ в зависимости от режима измерений и количества измерений в цикле;

- разработаны и опробованы на практике методы контроля характеристик прицелов в ходе стрельбовых испытаний при использовании разработанного оптико-электронного комплекса, отличающиеся малой погрешностью и безопасностью для оператора и технического состояния стрелкового оружия, вследствие осуществления внешнего базирования лазера;

- максимальное отклонение величины смещения линии визирования контролируемого прицела от среднего значения, вычисленного для способов, основанных на использовании нулевого коллиматора, ствольного коллиматора и проверочной стрельбы, составило не более $0,1'$, что подтверждает возможность контроля основных характеристик прицельной техники при помощи оптико-электронного комплекса в ходе стрельбовых испытаний.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

1 Разработаны функциональные схемы оптико-электронного комплекса, содержащие измерительную систему на основе лазера и позиционно-чувствительного фотоприёмника, которые обеспечивают определение пространственного положения линии визирования стрелковых прицелов с погрешностью, составляющей не более $16''$. Разработанные схемы защищены тремя патентами Российской Федерации на изобретение: №№ 2535583, 2535584, 2536570.

2 Разработаны алгоритмы относительного принципа определения координат прицельного знака с учётом координат положения лазерного пятна, определённых в системах координат соответствующих позиционно-чувствительных фотоприёмников оптико-электронного комплекса, которые исключают влияние личной ошибки оператора на результат измерения.

3 Разработаны методы определения положения линии визирования прицельной техники, основанные на использовании оптико-электронного комплекса, обеспечивающие снижение погрешности определения положения линии визирования в неавтоматизированном режиме в $7,5$ раза, в

автоматизированном режиме – от 12 до 16 раз по сравнению с известными техническими решениями.

4 Разработанный в рамках диссертации образец оптико-электронного комплекса прошел метрологическую калибровку в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Новосибирской области» (сертификат №003669 от 20.05.2014), что показало его полное соответствие значениям характеристик, полученным в ходе выполнения диссертационной работы и его готовность к участию в стрельбовых проверках.

5 Результаты стрельбовых проверок показали, что отклонение величины смещения линии визирования контролируемого прицела, определённой при помощи оптико-электронного комплекса, от среднего значения, вычисленного для способов, основанных на использовании нулевого коллиматора, ствольного коллиматора и проверочной стрельбы, составило 0,1', что практически подтверждает возможность использования принципов, реализованных в оптико-электронном комплексе, для решения задач, связанных с определением положения линии визирования прицельных устройств в составе стрелкового оружия.

6 Материалы диссертационного исследования используются в:

- научно-практической деятельности СФ ФКУ НПО «СТиС» МВД России в ходе испытаний стрелковых прицелов;
- научно-производственной деятельности ОАО «ЦНИИ «Циклон» при проверке характеристик экспериментальных и опытных образцов прицельной техники в рамках выполнения НИОКР;
- производственной деятельности АО «Швабе – Оборона и Защита» в ходе подготовки прицела 1П86 к серийному производству.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1 Бутримов, И.С. Определение положения линии визирования прицельных устройств с исключением ошибки оператора [Текст] / И.С. Бутримов, В.Б. Шлишевский // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 478 – 484.

2 Бутримов, И.С. Оптико-электронный комплекс для контроля положения линии визирования прицельных устройств в ходе стендовых испытаний [Текст] / И.С. Бутримов, В.С. Айрапетян // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 1. – С. 120 – 136.

3 Бутримов, И.С. Повышение точности стрельбы при помощи цифрового прицела с помощью системы индикации сваливания оружия [Текст] / И.С. Бутримов, А.А. Голицын, С.С. Мишанин // Специальная техника. – 2012. – №5. – С. 47 – 52.

4 Бутримов, И.С. Тепловизионные прицелы для стрелкового оружия: итоги выставки «Комплексная безопасность 2014» [Текст] / Бутримов И.С. Голицын А.А. // Спецтехника и связь. – 2014. – №5. – С. 12 – 16.

Работы, опубликованные в других изданиях:

5 Бутримов, И.С. О возможностях применения лазерного пристрелочного устройства «Рубин» ЛПУ-762 в задачах выверки оптических прицелов боевого стрелкового оружия [Текст] / И.С. Бутримов, А.В. Шеина // I Междунар. форум «Лазерполитех-2005» – «Технологии и средства обеспечения огневой подготовки»: сб. материалов. – Новосибирск: ООО НТЦ «Лазерные технологии». – 2006. – С. 43 – 45.

6 Бутримов, И.С. Новые отечественные разработки автоматизированных прицелов для снайперских винтовок и результаты их полигонных испытаний [Текст] / И.С. Бутримов, А.В. Журавлев, Д.В. Алантьев // ГЕО-Сибирь-2009: V Междунар. науч. конгр. 20 – 24 апреля 2009 г., сб. материалов в 5 т. Новосибирск: СГГА, 2009. – Т.5. – С. 34 – 38.

7 Бутримов, И.С. Опытный образец двухспектральной обзорно-прицельной системы и результаты его полигонных испытаний [Текст] / И.С. Бутримов, А.В. Журавлев, Г.Н. Попов, А.А. Топорков, А.В. Голицын // ГЕО-Сибирь-2009: V Междунар. науч. конгр. 20 – 24 апреля 2009 г., сб. материалов в 5 т. Новосибирск: СГГА, 2009. – Т.5. – С. 29 – 33.

8 Устройство для установки контрольно-выверочного приспособления на оружии [Текст]: пат. 130380 Рос. Федерация: МПК F41G 1/54 / Бутримов И.С., Аксенов В.А., Айрапетян В.С.; заявитель и патентообладатель ФКУ НПО «СТиС» МВД России. – 2012153139/12, заявл. 07.12.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

9 Бутримов, И.С. Основные аспекты контроля параметров прицельной техники в ходе полигонных испытаний [Текст] / И.С. Бутримов, В.С. Айрапетян, М.С. Комбаров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013: IX Междунар. науч. конгр. 15 – 26 апреля 2013 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Сибоптика-2013»: сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2013. – Т.2. – С. 178 – 183.

10 Бутримов, И.С. Оптико-электронное устройство для контроля

параметров прицельной техники [Текст] / И.С. Бутримов, В.С. Айрапетян // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014: X Междунар. науч. конгр. 8 – 18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Сибоптика-2014» : сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2014. – Т.2. – С. 139 – 144.

11 Устройство для контроля положения линии визирования прицелов [Текст] : пат. 2535583 Рос. Федерация : МПК F41G 1/54, G02B 23/00 / Бутримов И.С., Аксенов В.А. ; заявитель и патентообладатель ФКУ НПО «СТиС» МВД России. – 2013128859/12, заявл. 24.06.2013 ; опубл. 20.12. 2014, Бюл. № 35.

12 Устройство для контроля положения линии визирования прицелов [Текст] : пат. 2535584 Рос. Федерация : МПК F41G 1/54, G02B 23/00 / Бутримов И.С., Аксенов В.А. ; заявитель и патентообладатель ФКУ НПО «СТиС» МВД России. – 2013128788/12, заявл. 24.06.2013 ; опубл. 20.12. 2014, Бюл. № 35.

13 Устройство для контроля положения линии визирования прицелов [Текст] : пат. 2536570 Рос. Федерация : МПК F41G 1/54, G02B 23/00 / Бутримов И.С., Аксенов В.А., Топорков А.А. ; заявитель и патентообладатель ФКУ НПО «СТиС» МВД России. – 2013128789/12, заявл. 24.06.2013 ; опубл. 27.12. 2014, Бюл. № 36.

14 Топорков, А.А. Совершенствование прицельных сеток перспективных оптических и ночных прицелов [Текст] / А.А. Топорков, И.С. Бутримов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. 13 – 25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Сибоптика-2015» : сб. материалов в 3 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т.2 – С. 121 – 127.

15 Топорков, А.А. Сравнительный анализ сеток ночных прицелов [Текст] / А.А. Топорков, И.С. Бутримов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. 18 – 22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Сибоптика-2016» : сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – Т.3 – С. 57 – 63.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60 × 84/16, объём 1,25 п.л., тираж 100 экз.

заказ № 2264, подписано в печать 12.10.2016 г.