Оптический журнал

Оптическое приборостроение

УДК 535.421; 778.38

# Голографический прицел с одномерной телескопической оптической системой

© 2022 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук*; С. О. Старовойтов, аспирант**

*Филиал Корпорации «Комета» — «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург

**Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: s.starovoitov95@gmail.com

Поступила в редакцию 01.10.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2022-89-01-47-53

**Предложена схема голографического коллиматорного прицела с одномерной телескопической оптической системой. В основу схемы положено использование в оптической системе прицела одномерной телескопической оптической системы, образуемой ахроматизирующей дифракционной решеткой и голограммой, формирующей изображение прицельной марки.**

**Установлено, что непараллельно располагаемые плоская дифракционная решетка и голограмма могут выполнять функции одномерной телескопической системы. Такая система позволяет скомпенсировать различную расходимость излучения в главных сечениях входящего в состав прицела лазерного диода и уменьшить в одном из его главных сечений апертуру формируемого в прицеле параллельного пучка лучей, используемого для восстановления голограммы. Вместе с тем, такое взаимное расположение решетки и голограммы приводит к ограниченности спектрального диапазона, в пределах которого обеспечивается компенсация температурного дрейфа положения линии визирования. Представлены выражения, позволяющие определить соотношения пространственной частоты решетки с несущей пространственной частотой голограммы, позволяющие минимизировать температурный дрейф линии визирования. Приведены геометрические параметры схемы прицела, обеспечивающие при его минимальных габаритах остаточный температурный дрейф линии визирования, не превышающий угловое разрешение глаза. Рассмотрены технологические аспекты изготовления дифракционных оптических элементов прицела.**

**Предложенная в настоящей работе схема голографического коллиматорного прицела сочетает в себе основное достоинство схемы прицела световодного типа, а именно малое, составляющее 0,8 долю высоты апертуры голограммы, расстояние от основания прицела до линии визирования с относительной простотой сборки и юстировки элементов оптической схемы прицела, характерной для прицела с вогнутой дифракционной решеткой.**

***Ключевые слова:*** *голографический коллиматорный прицел, голограммная дифракционная решетка, одномерная телескопическая оптическая система, расчет основных геометрических параметров оптической схемы.*

***Коды OCIS:*** *090.0090, 090.2870, 090.2890*

## ВВЕДЕНИЕ

Разработчикам оптических систем голографических коллиматорных прицелов (см., например [1–4]) помимо задачи обеспечения дифракционного качества изображения прицельной марки приходится решать еще несколько специфических задач, характерных для та-

ких устройств. Среди них обеспечение неизменности положения линии визирования при температурном дрейфе длины волны излучения, применяемого в конструкции прицела лазерного диода, компенсация характерной для всех лазерных диодов различной расходимости излучения в двух его главных сечениях и минимизация расстояния от линии визирования до основания прицела. Так, для лазерных диодов ADL-65075TA2, широко используемых в отечественных разработках прицелов, длина волны излучения может изменяться от 0,645 до 0,660 мкм при основной (средней) длине волны излучения 0,655 мкм. При этом типичные значения расходимости излучения этого диода в двух его главных сечениях составляют 30 и 9°. С целью компенсации смещения линии визирования при температурном дрейфе длины волны излучения в оптическую систему прицела помимо голограммы, формирующей изображение прицельной марки и обладающей несущей пространственной частотой, вводится ахроматизирующая дифракционная решетка, компенсирующая хроматизм внеосевой голограммы. Отметим, что полная компенсация смещения линии визирования при изменении рабочей длины волны обеспечивается лишь в случае параллельного расположения голограммы и решетки, а также равенства пространственной частоты решетки несущей пространственной частоте голограммы. Эти условия в полной мере выполнены в прицелах с вогнутой дифракционной решеткой [3] и в прицеле световодного типа [4]. При этом в устройстве [4] за счет использования синтеза зрачка обеспечивается малое, составляющее 0,8-ю долю от высоты апертуры голограммы, расстояние от основания прицела до линии визирования. В прицеле [3] линия визирования располагается на расстоянии, в полтора раза большем высоты апертуры голограммы от основания прицела. Единственный способ сократить рассматриваемое расстояние в этом устройстве — перевернуть прицел на 180° и использовать в качестве его основания крышу. В других опубликованных оптических схемах прицелов (см., например [1, 2]) условия параллельности голограммы и решетки и равенства их пространственных частот нарушены, и линия визирования у них смещается при температурном дрейфе длины волны излучения лазерного диода, но смещается на допустимую для этих устройств величину, не превышающую угловую разрешающую способность глаза человека, составляющую ±1′. В прицеле [2] за счет непараллельного расположения голограммы и решетки и ухода от равенства пространственных частот голограммы и решетки авторам удалось значительно, более чем в 2 раза, уменьшить высоту апертуры решетки по сравнению с высотой апертуры голограммы при расстоянии от линии визирования до основания прицела, примерно равном 0,8-й доле от высоты апертуры голограммы. Вместе с тем непараллельно расположенные плоская дифракционная решетка и голограмма могут выполнять функции одномерной телескопической системы. Такая система позволяет скомпенсировать различную расходимость излучения в главных сечениях лазерного диода и уменьшить в одном из главных сечений прицела апертуру формируемого в прицеле параллельного пучка лучей, используемого для восстановления голограммы.

## ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОЛЛИМАТОРНОГО ПРИЦЕЛА С ОДНОМЕРНОЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Схема прицела с выполненной на решетке и голограмме одномерной дифракционной телескопической оптической системой представлена на рис. 1. В ней лазерный диод распо-

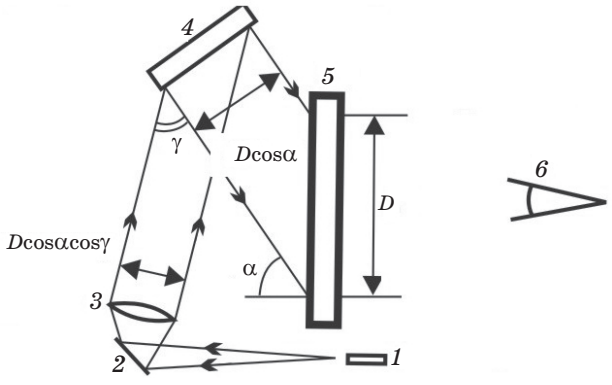



**Рис. 1.** Схема прицела с одномерной телескопической оптической системой. *1* — лазерный диод, *2* — зеркало, *3* — объектив, *4* — отражательная решетка с профилированным штрихом, *5* — голограмма, *6* — глаз.

лагается в переднем фокусе коллимирующего объектива. Телескопическую оптическую систему составляют голограмма, формирующая изображение прицельной марки, и плоская отражательная дифракционная решетка с профилированным штрихом. Решетка установлена перпендикулярно главному лучу пучка лучей, который формировался бы с помощью голограммы при ее восстановлении со стороны наблюдателя нормально падающей плоской волной с длиной, равной основной длине волны используемого лазерного диода.

Требуемое соотношение пространственных частот решетки и несущей частоты голограммы может быть рассчитано исходя из общих выражений, полученных при разработке прицела с вогнутой решеткой [3].

Для этого обратимся к рис. 2, на котором схематично изображены ахроматизирующая дифракционная решетка (АДР) и голограммный оптический элемент (ГОЭ). Здесь $N_1$ и $N_2$ — нормали, восстановленные из центров поверхностей решетки и голограммы, $\varepsilon$ и $\xi$ — углы, которые нормали $N_1$ и $N_2$ составляют с направлением распространения главного луча пучка, формирующего изображение прицельной марки.

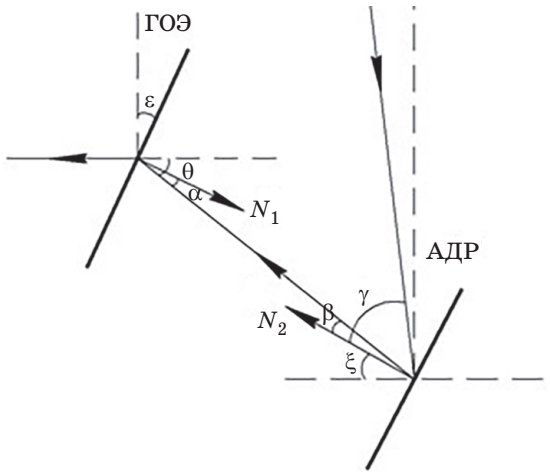



**Рис. 2.** Обобщенная схема голографического прицела. $N_1$ и $N_2$ — нормали, восстановленные из центров поверхностей решетки и голограммы, $\varepsilon$ и $\xi$ — углы, которые нормали $N_1$ и $N_2$ составляют с направлением распространения главного луча пучка, формирующего изображение прицельной марки, $\alpha$ — угол падения пучка, продифрагировавшего на структуре АДР, на поверхность ГОЭ.

Воспользуемся известными формулами пропускающей и отражательной дифракционных решеток

$$\sin\alpha = \lambda\vartheta_H - \sin\varepsilon, \tag{1}$$

$$\sin\beta + \sin\gamma = \lambda\vartheta_G, \tag{2}$$

где $\lambda$ — длина волны излучения, $\alpha$ — угол падения пучка, продифрагировавшего на структуре АДР, на поверхность ГОЭ, $\vartheta_H$ и $\vartheta_G$ — пространственные частоты голограммы и решетки соответственно. Отсюда, с учетом того, что согласно рис. 2 $\alpha = \theta - \varepsilon$ и $\beta = \theta - \xi$, получим выражение, описывающее значение угла $\gamma$, т.е. угла дифракции главного луча пучка, продифрагировавшего на АДР, в случае падения на поверхность ГОЭ в обратном ходе лучей пучка, параллельного главному лучу изображения прицельной марки,

$$\begin{aligned}\sin\gamma &= \lambda\vartheta_G - \sin\beta = \\ &= \lambda\vartheta_G + \sin\alpha\cos(\varepsilon-\xi) - \cos\alpha\sin(\varepsilon-\xi).\end{aligned} \tag{3}$$

Из выражения (1) получим

$$\frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{\vartheta_H}{\cos\alpha}. \tag{4}$$

Из соотношения (3) с учетом (4) найдем выражение, описывающее приращение синуса угла $\gamma$ при малом изменении рабочей длины волны излучения

$$\begin{aligned}d(\sin\gamma) &= \cos\gamma\frac{d\gamma}{d\lambda}d\lambda = \\ &\left\{\vartheta_G - \vartheta_H\left[\cos(\xi-\varepsilon) + \operatorname{tg}\alpha\sin(\xi-\varepsilon)\right]\right\}d\lambda.\end{aligned} \tag{5}$$

Приравняв выражение (5) к нулю, получим соотношение (6), описывающее условие минимального влияния дрейфа рабочей длины волны на угол $\gamma$

$$\vartheta_G = \vartheta_H\left[\cos(\xi-\varepsilon) + \operatorname{tg}\alpha\sin(\xi-\varepsilon)\right]. \tag{6}$$

Отметим, что при рассмотрении оптической системы, представленной на рис. 2, не в обратном, а в прямом ходе лучей, выражение (6) будет описывать условие стабилизации линии визирования прицела при изменении рабочей длины волны.

Для прицела, схема которого представлена на рис. 1, $\varepsilon = 0$, а $\xi = \alpha$. Отсюда получаем

$$\vartheta_G = \vartheta_H(\cos\alpha + \mathrm{tg}\alpha\sin\alpha) = \frac{\vartheta_H}{\cos\alpha}. \qquad (7)$$

Следовательно, в схеме прицела, приведенной на рис. 1, минимальное смещение положения линии визирования при температурном дрейфе длины волны излучения будет наблюдаться при несущей пространственной частоте голограммы, равной пространственной частоте дифракционной решетки, умноженной на косинус угла дифракции излучения с основной длиной волны на голограмме при ее восстановлении в обратном ходе лучей. Такое соотношение пространственных частот соответствует случаю восстановления голограммы со стороны наблюдателя нормально падающим на голограмму параллельным пучком лучей.

Проведем численный расчет достигаемой степени ахроматизации, т.е. постоянства положения линии визирования при температурном дрейфе длины волны излучения, для традиционно используемого в прицелах лазерного диода ADL-65075TA2. Основная длина волны его излучения 0,655 мкм. Минимальная длина волны — 0,645 мкм, а максимальная — 0,660 мкм. Положим несущую пространственную частоту голограммы $\vartheta_H$ равной 1000 1/мм. Тогда пространственная частота решетки $\vartheta_G$ должна быть равна 1323,4 1/мм. Могут быть выбраны и другие пары частот, например, 900 1/мм и 1114,2 1/мм. Для первой из выбранных пары частот, т.е. для 1000 1/мм и 1323,4 1/мм, угол дифракции излучения на голограмме для основной длины волны $\alpha_{main} = 40{,}91965°$. При этом $\alpha_{min} = 40{,}16568°$, а $\alpha_{max} = 41{,}29987°$. Если угол падения излучения с основной длиной волны на решетку $\xi_{main}$ принять равным 0°, то $\xi_{min} = -0{,}75397°$, а $\xi_{max} = 0{,}38022°$. Тогда углы дифракции $\gamma$ будут равны $\gamma_{main} = 60{,}09198°$, $\gamma_{min} = 60{,}08299°$, $\gamma_{max} = 60{,}08998°$. При этом $\gamma_{main} - \gamma_{min} = 0{,}61'$, а $\gamma_{max} - \gamma_{main} = 0{,}12'$. Отметим, что допуск на смещение линии визирования обычно принимают равным угловой разрешающей способности глаза, т.е. $\pm 1'$. Следовательно, в данном случае допуск не превышен.

Для второй из указанных пары частот $\alpha_{main} = 36{,}12153°$, $\alpha_{min} = 35{,}48572°$, а $\alpha_{max} = 36{,}44138°$. Если угол падения излучения с основной длиной волны лазерного диода на решетку $\xi_{main}$ по-прежнему принять равным 0°, то $\xi_{min} = -0{,}63581°$, а $\xi_{max} = 0{,}31985°$. Тогда углы дифракции $\gamma$ будут равны $\gamma_{main} = 46{,}86971°$, $\gamma_{min} = 46{,}86592°$, $\gamma_{max} = 46{,}86876°$. При этом $\gamma_{main} - \gamma_{min} = 0{,}23'$, а $\gamma_{max} - \gamma_{main} = 0{,}06'$. То есть в данном случае смещение линии визирования меньше, чем в первом из рассмотренных случаев.

Проведем аналогичный расчет для пары частот 1050 1/мм и 1446,4 1/мм. Для них $\alpha_{main} = 43{,}45226°$, $\alpha_{min} = 42{,}62912°$, а $\alpha_{max} = 43{,}86807°$. Если угол падения излучения с основной длиной волны на решетку $\xi_{main}$ вновь принять равным 0°, то $\xi_{min} = -0{,}82314°$, а $\xi_{max} = 0{,}41574°$. Тогда углы дифракции $\gamma$ будут равны $\gamma_{main} = 71{,}33250°$, $\gamma_{min} = 71{,}31497°$, $\gamma_{max} = 71{,}32821°$. При этом $\gamma_{main} - \gamma_{min} = 1{,}05'$, а $\gamma_{max} - \gamma_{main} = 0{,}27'$. То есть допуск выбран практически полностью, и ситуация хуже, чем в первом из рассмотренных случаев.

Проведенные расчеты, а также результаты анализа выражения (5) свидетельствуют о том, что смещение положения линии визирования при температурном дрейфе длины волны излучения лазерного диода тем меньше, чем ближе друг к другу значения пространственной частоты решетки и несущей пространственной частоты голограммы. Следовательно, смещение линии визирования тем меньше, чем меньше увеличение одномерной телескопической системы, входящей в состав прицела. В пределе для увеличения $1^{\times}$, т.е. в случае параллельно расположенных решетки и голограммы их пространственные частоты будут равны, и смещения линии визирования не будет вовсе. При этом, с точки зрения минимизации габаритов прицела, целесообразно выбрать схему его оптической системы с максимально допустимым увеличением телескопической оптической системы.

Для использования в оптической системе голографического коллиматорного прицела выберем значения несущей пространственной частоты голограммы и пространственную частоту дифракционной решетки равными 1000 1/мм и 1323,4 1/мм соответственно.

Компоновка прицела с указанными выше параметрами и в случае голограммы размером 32×24 мм представлена на рис. 3. Смещение линии визирования у такого прицела в пределах спектральной полосы диода

ADL-65075TA2 составляет +0,52′ и −0,13′. Напомним, что допуск на этот параметр обычно задается равным ±1′.

Из рис. 3 можно сделать вывод о возможности расположения всех элементов прицела в пределах параллелепипеда длиной 45 мм, высотой 55 и шириной 35 мм. При этом линия визирования прицела располагается на высоте 22 мм от основания прицела, т.е. на расстоянии 0,8-й доли от высоты апертуры голограммы. В качестве достоинств предлагаемого прицела могут быть отмечены низкое расположение оси визирования, компенсация различной расходимости излучения лазерного диода в его главных сечениях и направление распространения пучка лучей, восстанавливающего голограмму, вниз на оружие, а не вверх в пространство, как у других прицелов. Входящие в состав прицела голограмма и решетка образуют телескопическую систему с увеличением 2,6×. Соотношение расходимости излучения лазерного диода в его главных сечениях 30° к 9°, т.е. равно 3,3. Примерное равенство увеличения одномерной телескопической системы соотношению расходимости излучения диода свидетельствует о хорошей коррекции в предлагаемой оптической системе прицела различия расходимости излучения диода в его главных сечениях. Отметим, что использование для этой цели традиционных оптических элементов двоякой симметрии, т.е. цилиндрических линз, в голографических прицелах недопустимо, поскольку приводит к астигматизму в восстанавливающем голограмму пучке лучей, существенно искажающему изображение прицельной марки.

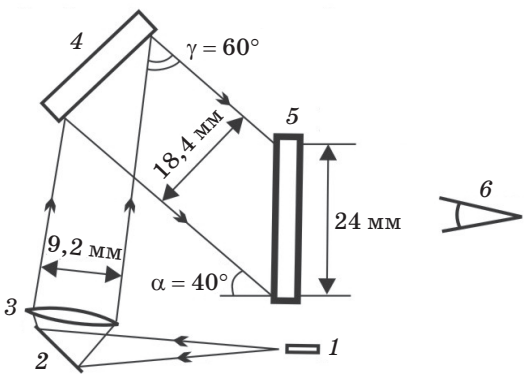



**Рис. 3.** Компоновка прицела в случае голограммы с несущей пространственной частотой 1000 1/мм и пространственной частотой решетки 1323,4 1/мм. *1* — лазерный диод, *2* — зеркало, *3* — объектив, *4* — отражательная решетка с профилированным штрихом, *5* — голограмма, *6* — глаз.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА

В данном разделе обсудим технологические аспекты изготовления дифракционных элементов для голографического прицела. При этом основное внимание уделим вопросу возможности и перспективности регистрации голограмм для прицелов в излучении с длиной волны, существенно меньшей их рабочей длины волны, как правило, равной 0,655 мкм. Рассматривать возможные способы изготовления входящей в состав прицела дифракционной решетки бессмысленно. Очевидно, что решетка должна быть рельефно-фазовой с обеспечивающим высокую дифракционную эффективность профилированным штрихом и изготавливаться относительно недорогим и обеспечивающим высокую воспроизводимость традиционным методом копирования дифракционных решеток. Отметим, что дифракционная эффективность копий такой решетки с углом дифракции нормально падающего излучения 60° может достигать 65%.

С голограммой, формирующей изображение прицельного знака, все значительно сложнее. Она, что принципиально, должна быть квазиобъемной, т.е. при относительно малой дифракционной эффективности, не превышающей 5%, обладать заметной угловой селективностью. Малая дифракционная эффективность и заметная угловая селективность голограммы нужны для обеспечения ее 80%-го интегрального пропускания в нулевом порядке дифракции в видимом диапазоне спектра, обычно требуемого в голографических прицелах. Кроме того, угловая селективность голограммы нужна для предотвращения появления в поле зрения работающего с прицелом оператора первого и высших порядков дифракции излучения, поступающего в прицел из окружающего пространства, в том числе и со стороны цели. Поэтому на сегодняшний день основным способом изготовления голограмм, формирующих изображение прицельного знака, является способ,

основанный на непосредственной регистрации голограммы когерентным излучением с длиной волны, равной основной рабочей длине волны голографического прицела. Использование для регистрации голограммы излучения с длиной волны, равной рабочей длине волны прицела существенно ограничивает круг пригодных к использованию для этой цели регистрирующих сред, оставляя за его пределами такие широко используемые в голографии регистрирующие среды, как слои бихромированной желатины и значительную долю фоторезистов.

Рассмотрим возможность использования для регистрации голограммы, формирующей изображение прицельной марки, излучения с длиной волны, отличной от рабочей длины волны прицела. Сделаем это в рамках непараксиального анализа аберраций третьего порядка голограмм. Из анализа приведенных в работе [5] выражений, описывающих аберрации в восстановленном изображении, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом случае параллельных восстанавливающего и опорного пучков и объекта, находящегося на бесконечности, неравенство длин волн регистрации и восстановления голограммы не приведет к аберрациям в восстановленном изображении. Оно лишь приведет к изменению несущей пространственной частоты голограмм и к искажению геометрических размеров изображения прицельной марки в дифракционном сечении голограммы, т.е. в сечении плоскостью, в которой находились главные лучи опорного и объектного пучков при ее регистрации. Для компенсации влияния неравенства длин волн регистрации и восстановления голограммы необходимо при регистрации голограммы прицельной марки изменить угол падения опорного пучка и внести предискажения в угловой размер регистрируемого транспаранта в дифракционном сечении голограммы в соответствии с выражениями

$$\sin\alpha_C = \mu \sin\alpha_R,$$

$$\sin\alpha_I = \mu \sin\alpha_O, \qquad (8)$$

где $\alpha_C$ — угол падения восстанавливающего пучка лучей на голограмму в прицеле, $\alpha_R$ — угол падения опорного пучка при регистрации голограммы, $\alpha_I$ — угловая координата того или иного элемента изображения прицельной марки при восстановлении голограммы, $\alpha_O$ — угловая координата того же элемента прицельной марки при регистрации голограммы, $\mu$ — отношение основной рабочей длины волны прицела к длине волны регистрации голограммы. Поскольку углы $\alpha_I$ и $\alpha_O$ обычно малы, можно сделать вывод о справедливости последнего из приведенных соотношений не только для синусов углов, но и для самих углов. То есть можно сделать вывод о возможности регистрации голограммы для прицела на длине волны, отличной от длины волны ее восстановления. Условиями обеспечения такой возможности будут уменьшение синуса угла падения опорного пучка на голограмму в $\mu$ раз и использование в схеме регистрации прицельной марки транспаранта с уменьшенными в $\mu$ раз размерами марки в дифракционном сечении голограммы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в настоящей работе схема голографического коллиматорного прицела сочетает в себе основные достоинства схемы прицела световодного типа [4] с относительной простотой сборки и юстировки элементов оптической схемы прицела, характерной для прицела с вогнутой дифракционной решеткой [3]. Выявленная в результате проведенной работы зависимость смещения линии визирования прицела при дрейфе рабочей длины волны источника излучения от несущей пространственной частоты голограммы свидетельствует о том, что в случае непараллельных друг другу рабочих поверхностей голограммы и решетки смещение растет с ростом несущей пространственной частоты голограммы. Параллельное расположение голограммы и решетки обуславливает единичное увеличение телескопической системы и приводит к отсутствию смещения визирной линии при любых равных друг другу пространственных частотах голограммы и решетки. Продемонстрированная возможность использования для регистрации голограммы излучения с длиной волны, отличной от рабочей длины волны прицела, позволяет надеяться на разработку в ближайшем будущем технологии

изготовления квазиобъемных голограмм путем дополнительной постэкспозиционной обработки рельефно-фазовых голограмм, что избавит от необходимости регистрации голограмм для прицелов методом печати в когерентном излучении.

### ЛИТЕРАТУРА


1. *Ковалев М.С., Козинцев В.И., Лушников Д.С., Маркин В.В., Одиноков С.Б.* Способ компенсации изменения положения прицельного знака и голографический коллиматорный прицел // Патент России № 2355989. 2007.
2. *Anthony M., Northville T., Sieczka E.J.* Saline lightweight holographic sight // Patent USA № 6490060. 2002.
3. *Корешев С.Н., Шевцов М.К.* Оптические системы голографических коллиматорных прицелов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 22–28.
4. *Корешев С.Н., Шевцов М.К.* Голографический прицел световодного типа с синтезированным зрачком // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 3. С. 38–42.
5. *Champage E.B.* Nonparaxial imaging, magnification and aberration properties in holography // JOSA. 1967. V. 57. № 1. P. 51–55.