



УДК 623.62
ГРНТИ 78.25.41

СНИЖЕНИЕ ЗАМЕТНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ИХ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ПУТЕМ ЧАСТИЧНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ОТРАЖЕННОГО ПОТОКА

*В.Д. ПОПЕЛО, доктор технических наук, старший научный сотрудник
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Д.К. ПРОСКУРИН, кандидат физико-математических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
П.Е. КУЛЕШОВ, кандидат технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье на основе анализа закономерностей взаимодействия направленного оптического излучения с оптико-электронными средствами разработаны модели формирования областей локализации «зон блеска», излучение которых оказывает определяющее влияние на формирование отраженного сигнала. Обосновано, что наличие aberrаций оптической системы оптико-электронных средств приводит к возникновению в пределах апертуры оптико-электронных средств нескольких «зон блеска» – центральной и сопряженных периферийных. Положение центральной «зоны блеска» определяется положением изображения излучающей апертуры оптического локатора, а положение периферийных – aberrацией объектива оптико-электронных средств и углового положения изображения излучающей апертуры локатора относительно оптической оси оптико-электронных средств. Установлено, что для подавления отраженных сигналов от периферийных «блестящих зон» достаточно использовать по одному поглощающему экрану для каждой пары с размерами сопоставимыми с размерами первой зоны Френеля сферической волны отраженной от оптико-электронных средств в области центральной «зоны блеска».

Ключевые слова: оптико-электронное средство, эффективная площадь рассеяния, оптический (лазерный) локатор, падающее и отраженное оптические излучения, фокальная плоскость, aberrация оптической системы, зона блеска, зона Френеля, центральная зона блеска, сопряженные периферийные зоны блеска, поглощающий экран.

REDUCING THE VISIBILITY OF OPTOELECTRONIC DEVICES IN THE CONDITIONS OF THEIR OPTICAL-LOCATION OBSERVATION BY PARTIALLY SHIELDING THE REFLECTED FLOW

*V.D. POPELO, Doctor of Technical sciences, Senior Researcher
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
D.K. PROSKURIN, Candidate of Physic-Mathematical sciences, Associate Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
P.E. KULESHOV, Candidate of Technical sciences, Associate Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

In the article, based on the directed optical radiation with optoelectronic means interaction patterns analysis, models for the «brilliance zones» localization areas formation, the radiation of which has a determining influence on the reflected signal formation, are developed. It is proved that the presence of aberrations of the optoelectronic means optical system leads to the appearance of several «brightness zones» within the optoelectronic means aperture – the central and conjugate peripheral



ones. The position of the Central «zone of brilliance» will be determined by the position of the image of the radiating aperture of the optical locator, and the position of the peripheral – aberration lens optoelectronic means and the angular position of the image of the radiating aperture of the locator relative to the optical axis of the optoelectronic means. It was found that to suppress the reflected signals from the peripheral «bright zones», it is sufficient to use one absorbing screen for each pair with dimensions comparable to the size of the first Fresnel zone of a spherical wave reflected from the optoelectronic means in the area of the central «bright zone».

Keywords: optical-electronic means, effective scattering area, optical (laser) locator, incident and reflected optical radiation, focal plane, optical system aberration, gloss zone, Fresnel zone, central gloss zone, conjugate peripheral gloss zones, absorbing screen.

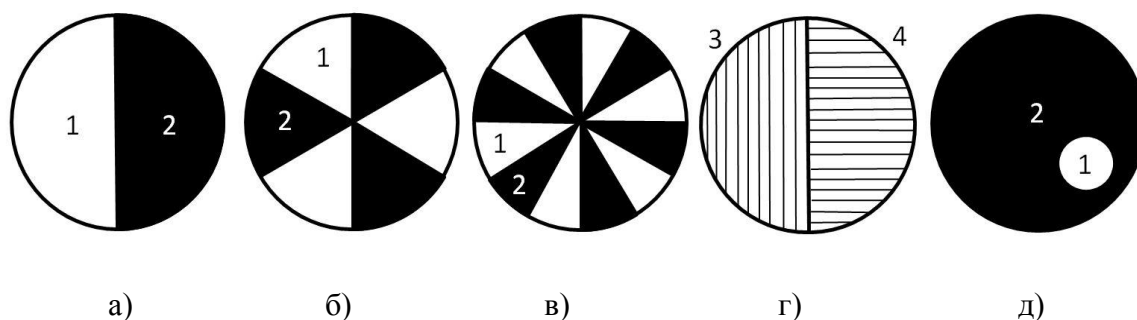
Введение. Пассивные оптико-электронные средства (ОЭС) обладают высокой скрытностью функционирования, если не используются системы оптико-локационной разведки [1]. В условиях же активного оптического зондирования ОЭС выступают как малоразмерные отражатели с высоким блеском, возвращая часть падающего излучения в виде узкого пучка, направленного на источник подсвета. Яркие блики отраженного излучения на фоне менее интенсивного излучения, рассеянного телами с шероховатой поверхностью (образцами вооружения и военной техники) и природными образованиями служат отчетливыми демаскирующими признаками наличия и функционирования пассивных ОЭС. Если характеризовать заметность ОЭС в условиях оптико-локационного наблюдения величиной эффективной площади рассеяния (ЭПР) [2], то для ОЭС различных типов эта характеристика может принимать значения от единиц квадратных метров для лазерных головок самонаведения управляемых ракет до десятков тысяч квадратных метров для телевизионных и оптико-визуальных средств наблюдения с высококачественными оптическими системами. Общая тенденция изменения заметности этих средств заключается в том, что ОЭС, формирующие более качественного изображения сцены, обладают и более высоким значением ЭПР.

Актуальность. Несмотря на очевидное влияние отражающих свойств ОЭС на обеспечение их устойчивого функционирования в условиях боя, нормирование этих характеристик до настоящего времени не проводится и меры по снижению заметности в процессе проектирования ОЭС не предпринимаются. Это обстоятельство подталкивает ряд авторов к разработке паллиативных мер борьбы с бликами отраженного ОЭС зондирующего излучения. Эти меры реализуются путем использования дополнительных устройств, обеспечивающих избирательное экранирование части потока падающего и отраженного оптического излучения [3]. В силу нелокального характера отражения оптического излучения от ОЭС, любому падающему на апертуру ОЭС лучу соответствует отраженный, не совпадающий в пространстве, а часто симметричный относительно положения оптической оси ОЭС отраженный луч. При этом реализуется принцип взаимности: если падающий луч направить строго по траектории отраженного, то новый отраженный луч выйдет из ОЭС строго по траектории первоначального падающего [3]. Поэтому проведя несимметричное экранирование половины (или большей части) апертуры и тем самым перекрыв траектории отраженных лучей, можно радикально снизить ЭПР ОЭС, ограничивая половину (или большую часть) мощности полезного сигнала. Разнообразие подобных устройств определяют, прежде всего, различия конфигурации прозрачных и непрозрачных участков экрана, устанавливаемого в плоскости апертуры ОЭС (рисунок 1, где 1 – прозрачная область экрана; 2 – непрозрачная область экрана; 3, 4 – поляризационные фильтры с взаимно ортогональными плоскостями поляризации). Поэтому основным и главным недостатком известных решений по снижению ЭПР ОЭС является существенное и часто неприемлемое снижение потока полезного сигнала.

Второй недостаток обычно ускользает из виду. Он заключается в том, что предлагаемые фиксированные конфигурации прозрачных и непрозрачных областей экрана обеспечивают эффективное подавление блика отражения только при строго нормальном падении



зондирующего оптического излучения на апертуру ОЭС. В ситуациях наклонного падения, когда оптический локаатор еще находится в пределах углового поля ОЭС, но расположен на его периферии, любая фиксированная заранее конфигурация областей экрана может оказаться совершенно неэффективной (рисунок 2, где 1 – оптический локаатор; 2 – ОЭС; 3 – передняя фокальная плоскость объектива ОЭС; 4 – объектив ОЭС; 5 – отражающая поверхность (поверхность чувствительного элемента фотоприемного устройства ОЭС или сетка оптико-визуального прибора); 6 – задняя фокальная поверхность объектива ОЭС; 7 – непрозрачная область экрана для «подавления» блика отраженного излучения; 8 – оптическая ось ОЭС).



а) двухсекторный экран; б) шестисекторный экран; в) десятисекторный экран; г) поляризационный экран; д) экран для обеспечения работы ночного прицела в условиях высокой естественной освещенности

Рисунок 1 – Примеры технических решений, направленных на снижение интенсивности блика отраженного от ОЭС зондирующего излучения и увеличение скрытности функционирования этих средств

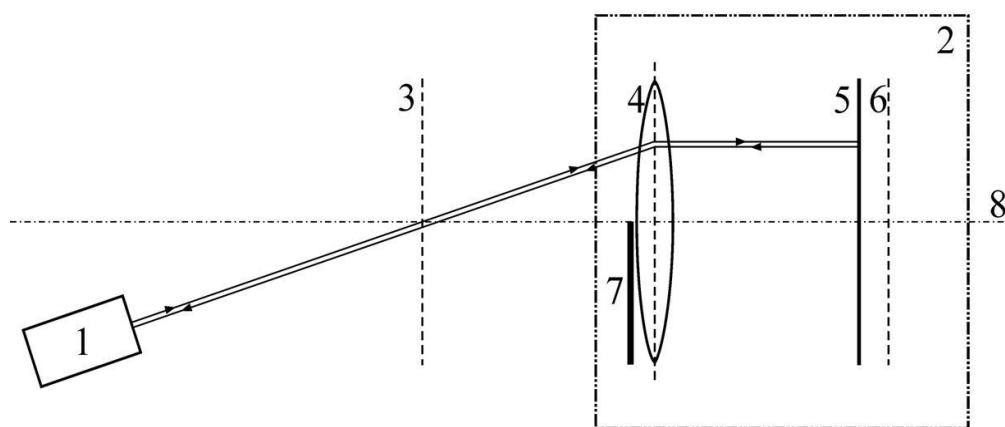


Рисунок 2 – Схема формирования блика отраженного излучения при расположении источника зондирующего излучения в стороне от оптической оси ОЭС

Поэтому целью настоящей работы является разработка паллиативных мер для подавления отражения от ОЭС, пусть и основанных на частичном экранировании апертуры, но не приводящих к существенному снижению полезного сигнала и обеспечивающих снижения заметности ОЭС при произвольном расположении источника зондирующего излучения (средства оптической локации) в пределах углового поля.

Некоторые закономерности отражения направленного оптического излучения оптическими системами ОЭС и связанные с ними допущения.

При решении поставленной задачи будем опираться на предположение о том, что отражение оптического излучения от большинства ОЭС носит когерентный характер [4]. Это условие на практике выполняется практически всегда вследствие того обстоятельства, что



поверхность элемента оптической системы, лежащего вблизи задней фокальной плоскости объектива ОЭС, является зеркальной. При этом расходимость отраженного от ОЭС излучения обычно заметно превышает дифракционную, вследствие чего на формирование принимаемого оптическим локатором сигнала оказывают лишь те участки фронта отраженной волны (лучи), которые локализованы вблизи нормали к этому фронту, обращенной к источнику зондирующего излучения. Поэтому идея предлагаемого в статье подхода к снижению заметности ОЭС в условия оптико-локационного наблюдения заключается в том, чтобы в каждой конкретной ситуации определять положение этих локальных участков в зависимости от ориентации ОЭС и расположения источника зондирующего излучения в угловом поле. Экранированию должны подвергаться только эти участки апертуры. Эти участки в дальнейшем будем называть «зонами блеска». Можно утверждать, что в том случае, когда «зоны блеска» имеют размеры меньше апертуры ОЭС и не касаются ее краев, то для определения их положения, а часто и их размеров, может быть использован метод геометрической оптики [5]. Используя матричный формализм геометрической оптики [6], представим оператор преобразования параметров зондирующего излучения в процессе отражения от ОЭС в виде матрицы [M] следующего вида [7]:

$$[M] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2\Delta}{f^2} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{R_\infty} & -1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние объектива ОЭС; Δ – смещение отражающей поверхности относительно положения задней фокальной плоскости объектива ОЭС ($\Delta > 0$, если $d > f$; $\Delta < 0$, если $d < f$, d – расстояние от объектива до отражающей поверхности); $R_\infty = -\frac{f^2}{2\Delta}$ – радиус кривизны волнового фронта отраженного от ОЭС излучения при условии облучения плоской волной ($R_\infty > 0$, если отраженная от ОЭС волна расходящаяся; $R_\infty < 0$, если – сходящаяся).

Матрица [M] связывает высоту h_0 и угол наклона α_0 падающего луча в опорной плоскости анализа с аналогичными параметрами h и α этого луча, выходящего из ОЭС после отражения. Следует отметить, что простой вид матрицы (1) достигается при выборе опорной плоскости анализа в передней фокальной плоскости объектива [7]. При условии, что дальность локационного наблюдения ОЭС $L \gg f$, такой перенос положения опорной плоскости анализа не влияет на точность решения задачи.

Проведем расчет положения и размеров «зон блеска» и соответственно размеров экранов, необходимых для «подавления» бликов отраженного излучения для различных типовых ситуаций оптической локации ОЭС.

Локация ОЭС в дальней зоне.

При локационном наблюдении ОЭС расположенного на значительном расстоянии можно полагать, что на его апертуру падает плоская волна, то есть все лучи зондирующего излучения вне зависимости от их высоты падают на ОЭС под одним и тем же углом α_0 . Положение «зон блеска» будут определять лучи, выходящие из ОЭС строго в направлении на источник зондирующего излучения, то есть под углом $\alpha = -\alpha_0$. Матричное выражение, связывающее параметры луча на входе и выходе ОЭС (в опорной плоскости анализа) имеет вид

$$\begin{bmatrix} h \\ -\alpha_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2\Delta}{f^2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$



Откуда следует, что $-\alpha_0 = \frac{2\Delta h_0}{f^2} - \alpha_0$ или

$$\frac{2\Delta h_0}{f^2} = 0. \tag{3}$$

Соотношение (3) свидетельствует о том, что только луч пересекающий ось ОЭС в передней фокальной плоскости, когда $h_0 = 0$, после отражения проходит по траектории падающего луча ($h = -h_0 = 0$) и возвращается строго в точку расположения источника зондирующего излучения. При этом в плоскости апертуры высота этого луча составит величину $h' = f\alpha_0$. Таким образом, точка с высотой $h' = f\alpha_0$ относительно оси ОЭС, лежащая в плоскости, проходящей через ось ОЭС и луч зондирующего излучения с высотой в опорной плоскости $h_0 = 0$, представляет собой центр «зоны блеска». Очевидно, что изменение положения источника зондирующего излучения относительно оси ОЭС и соответственно изменение угла α_0 будет приводить к изменению положения «зоны блеска» в пределах апертуры ОЭС. Только при значении угла $\alpha_0 = 0$, когда центр «зоны блеска» расположен на оси ОЭС оказываются действительны предложенные ранее меры подавления блика отраженного излучения, опирающиеся на фиксированные конфигурации прозрачных и непрозрачных участков экрана.

Размер экрана, перекрывающего основную часть зоны блеска при локации ОЭС в дальней зоне может быть определен с использованием понятия «первая зона Френеля» [8], определяющего размеры участка фронта волны, оказывающего определяющее влияние на ее амплитуду в удаленной точке анализа. Учитывая сферичность отраженной от ОЭС волны в дальней зоне, радиус первой зоны Френеля может быть определен как [4]

$$a_f = \sqrt{\lambda |R_\infty|} = f \sqrt{\lambda / 2 |\Delta|}, \tag{4}$$

где λ – длина волны зондирующего излучения.

Таким образом, если в точке соответствующей центру «зоны блеска» ($x = f\alpha_{0x}$, $y = f\alpha_{0y}$, $\alpha_0^2 = \alpha_{0x}^2 + \alpha_{0y}^2$) разместить экран с радиусом $r_s \geq a_f$ влияние блика отраженного излучения в дальней зоне локации ОЭС можно считать практически подавленным (рисунок 3, где 1 – 8 соответствуют обозначениям на рисунке 2; 9 – центр апертуры ОЭС; 10 – поглощающий экран; 11 – точка, определяющая положение центра экрана).

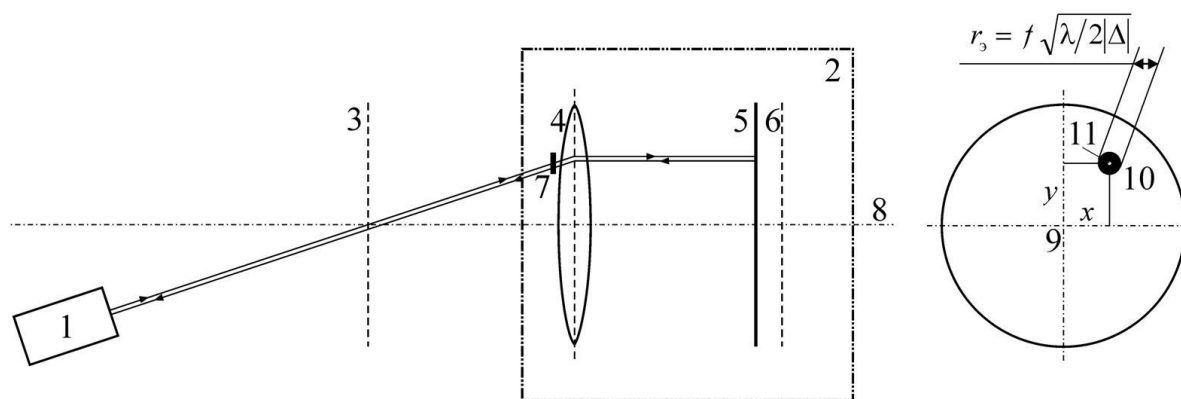


Рисунок 3 – Схема иллюстрирующая, предлагаемый способ «подавления» блика отраженного от ОЭС излучения



Расчеты показывают, что для типовых значений параметров ОЭС, например, $f = 100 \text{ мм}$, $\Delta = 1,0; 0,1 \text{ мм}$, и при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 1,0 \text{ мкм}$ радиус экрана будет составлять соответственно $r_3 \geq 2,2; 7,0 \text{ мм}$. Если при этом, если предположить, что радиус апертуры ОЭС равен $r_{\text{ОЭС}} = 30 \text{ мм}$, то потери полезного потока в первом случае (при ЭПР ОЭС $\sigma \approx 100 \text{ м}^2$) составят около 0,5 %, а во втором (при ЭПР ОЭС $\sigma \approx 10^4 \text{ м}^2$) – 5,5 %.

Локация ОЭС на трассах конечной протяженности.

Противодействие локации ОЭС на трассах конечной протяженности может потребовать некоторого увеличения размеров экрана для подавления блика отраженного излучения. В этом случае размер (радиус) «зоны блеска» может быть рассчитан с использованием следующего соотношения

$$\begin{bmatrix} r_3 \\ -\alpha_0 - \frac{a}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{R_\infty} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ \alpha_0 + \frac{h_0}{R} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где a – радиус приемной апертуры оптического локатора; L – длина локационной трассы; R – радиус кривизны волнового фронта зондирующего излучения в плоскости апертуры ОЭС (при локации сферической волной $R = L$, при локации коллимированным пучком $R = L \left[1 + \left(\frac{\pi r_0^2}{\lambda L} \right)^2 \right]$;

r_0 – радиус излучающей апертуры оптического локатора.

Из соотношения (5) следует, что

$$r_3 = \frac{a}{\frac{L}{R_\infty} + \frac{L}{R}}. \quad (6)$$

В двух характерных случаях, когда ОЭС облучают сферической волной ($R = L$) или плоской ($R \rightarrow \infty$), выражение (6) принимает вид

$$r_3 = \frac{aR_\infty}{L + R_\infty}, \quad r_3 = \frac{aR_\infty}{L}. \quad (7)$$

При условии, что $L \gg R_\infty$, значения r_3 , рассчитанные с использованием обеих формул (7) не различимы. Значение r_3 не превысит радиуса первой зоны Френеля, если локация осуществляется на трассах протяженностью

$$L \geq \frac{\sqrt{2af}}{2|\Delta|^{1/2} \lambda^{1/2}}. \quad (8)$$

Для типовых значений параметров ОЭС и оптического локатора, например, $f = 100 \text{ мм}$, $\Delta = 1,0; 0,1 \text{ мм}$, $a = 0,05 \text{ м}$, $\lambda = 1,0 \text{ мкм}$, дальности, на которых необходимый радиус экрана, не превысит радиус первой зоны Френеля, составят $L \geq 110; 350 \text{ м}$. Таким образом, уже на трассах протяженностью более нескольких сот метров можно использовать экраны фиксированных размеров, соответствующих размерам первой зоны Френеля.

Локация на трассах конечной протяженности ОЭС при наличии aberrаций объектива.



Рассмотренные выше случаи оптической локации ОЭС соответствуют условиям, когда в плоскости апертуры этих средств формируется единственная «блестящая зона», локализованная в приосевой области. Если объектив ОЭС обладает aberrациями, например, сферической [9], то помимо центральной «блестящей зоны» могут формироваться и периферийные «блестящие зоны», которые также подлежат экранированию для снижения уровня локационного сигнала.

Определим положение центральной и периферийных «блестящих зон» при локации ОЭС, обладающих сферической aberrацией.

Наличие сферической aberrации оптической системы ОЭС приводит к тому, что в зависимости от высоты падающего h_0 и выходящего из системы h лучей, соответствующие значения фокусных расстояний f_{h_0} и f_h , а вследствие этого и соответствующие значения Δ_{h_0} и Δ_h смещения отражающей поверхности относительно положения задней фокальной плоскости объектива, будут различаться, а в плоскости апертуры ОЭП будет формироваться система «блестящих зон», создающих отраженный сигнал в точке расположения оптического локатора.

Определим положение центральной и периферийных «блестящих зон» при локации ОЭП, обладающих сферической aberrацией.

Наличие сферической aberrации оптической системы ОЭП приводит к тому, что в зависимости от высоты падающего h_0 и выходящего из системы h лучей, соответствующие значения фокусных расстояний f_{h_0} и f_h , а вследствие этого и соответствующие значения Δ_{h_0} и Δ_h смещения отражающей поверхности относительно положения задней фокальной плоскости объектива, будут различаться. Тогда матрица передачи оптической системы ОЭП как локационной цели примет вид

$$[M] = \begin{bmatrix} -\frac{f_h}{f_{h_0}} & 0 \\ \frac{\Delta_{h_0} + \Delta_h}{f_{h_0} f_h} & -\frac{f_{h_0}}{f_h} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

При этом опорная область анализа выбрана в передней фокальной плоскости объектива ОЭП [2].

Для величин фокусных расстояний и смещений отражающей поверхности для лучей разной высоты справедливы соотношения

$$f_{h_0} + \Delta_{h_0} = f_h + \Delta_h = f + \Delta. \quad (10)$$

Значения смещений Δ_{h_0} и Δ_h складываются из величин смещения $\Delta < 0$ отражающей поверхности относительно парааксиального фокуса и соответствующих продольных aberrаций Δ'_{h_0} и Δ'_h , при этом [9]

$$\Delta'_{h_0} = \frac{(h'_0)^2}{r_{\text{ОЭС}}^2} \Delta_a, \quad \Delta'_h = \frac{(h')^2}{r_{\text{ОЭС}}^2} \Delta_a, \quad (11)$$

где Δ_a – максимальное значение продольной сферической aberrации для луча входящего (выходящего) из ОЭП на высоте равной радиусу апертуры $r_{\text{ОЭС}}$; $h'_0 = h_0 + f\alpha_0$, $h' = h + f\alpha_0$ – значения высоты лучей в плоскости апертуры ОЭП.

Предположим, что сферическая aberrация объектива мала, то есть $f_{h_0} \gg \Delta'_{h_0}$, $f_h \gg \Delta'_h$ и $f_{h_0} \approx f_{h_0} \approx f$. Тогда матрица передачи (9) может быть преобразованная к виду



$$[M] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{\Delta_{h_0} + \Delta_h}{f^2} & -1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Связь параметров входящего (h_0, α_0) и выходящего (h, α) лучей в плоскости анализа, лежащей в передней фокальной плоскости объектива, будет определяться соотношениями

$$h = -h_0; \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\Delta_{h_0} + \Delta_h}{f^2} h_0 - \alpha_0. \quad (14)$$

Пусть α_0 – угол падения зондирующего излучения на апертуру ОЭП. Нас интересуют лучи, выходящие из оптической системы ОЭП строго в обратном направлении, когда $\alpha = -\alpha_0$, тогда справедливо уравнение

$$\frac{\Delta_{h_0} + \Delta_h}{f^2} h_0 = 0. \quad (15)$$

Первое решение этого уравнения $h_0 = 0$, соответствует лучу, пересекающему ось ОЭП в передней фокальной плоскости, и после отражения проходящему строго по траектории падающего луча ($h = -h_0 = 0$) и направленного в точку расположения источника зондирующего излучения. Высота этого луча в плоскости апертуры ОЭП равна $h'_1 = f\alpha_0$, определяет положение точки, в которой нормаль к фронту отраженного излучения направлена в точку приема, то есть в окрестности которой локализована центральная «зона блеска».

Существуют еще решения уравнения (15), которые определяются условием $\Delta_{h_0} + \Delta_h = 0$. Подставляя (11) в (15) и учитывая (10), получим уравнение

$$2\Delta + \frac{(h' + f\alpha_0)^2 \Delta_a}{r_{\text{ОЭС}}^2} + \frac{(-h' + f\alpha_0)^2 \Delta_a}{r_{\text{ОЭС}}^2} = 0, \quad (16)$$

решение которого имеет вид

$$h'_{2,3} = \pm r_{\text{ОЭС}} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a} - \frac{f^2}{r_{\text{ОЭС}}^2} \alpha_0^2}. \quad (17)$$

Решения (17) определяют точки, вблизи которых локализованы две периферийные «зоны блеска». Эти центры расположены в плоскости угла α_0 на прямой, лежащей в плоскости апертуры ОЭП и соединяющей главную точку и изображение оптического локатора (сердину центральной «блестящей зоны»). Расстояние между этими зонами равно

$$\delta'_{2,3} = h'_2 - h'_3 = 2r_{\text{ОЭС}} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a} - \frac{f^2}{r_{\text{ОЭС}}^2} \alpha_0^2}. \quad (18)$$

Из (18) следует, что по мере роста значения угла α_0 , расстояние между периферийными «блестящими точками» будет уменьшаться, а при значении угла



$$\alpha_0 = \pm \frac{r_{\text{ОЭС}}}{f} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a}}, \quad (19)$$

две периферийные и центральная «блестящая зоны» совместятся.

Еще две другие периферийные «блестящие зоны» лежат в плоскости апертуры ОЭП на прямой проходящей перпендикулярно следу плоскости поворота через середину центральной «блестящей зоны». Так как в этой плоскости угол поворота ОЭП относительно фронта падающего излучения равен нулю, расстояние между второй парой периферийных «блестящих зон» будет постоянным

$$\delta'_{4,5} = h'_4 - h'_5 = 2r_{\text{ОЭС}} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a}}. \quad (20)$$

На рисунке 4 (где 1 – оптический локатор; 2 – ОЭП; 3 – передняя фокальная плоскость объектива ОЭП; 4 – объектив ОЭП; 5 – отражающая поверхность (поверхность чувствительного элемента фотоприемного устройства ОЭП или сетка оптико-визуального прибора); 6 – задняя фокальная поверхность объектива ОЭП; 7 – оптическая ось ОЭП; 8 – центр апертуры ОЭП; 9 – сечение апертуры ОЭП плоскостью, в которой осуществлен поворот ОЭП относительно оси пучка зондирующего излучения; 10 – сечение плоскостью, перпендикулярной плоскости 9; 11 – центральная «зона блеска»; 12 – периферийные «зоны блеска») представлена конфигурация «блестящих зон» в случае наклонного падения фронта зондирующего излучения на апертуру ОЭП, обладающего аберрациями.

Таким образом, если оптическая система ОЭП обладает аберрациями, в плоскости его апертуры формируется пять «блестящих зон» (центральная и две пары периферийных). При этом периферийные зоны попарно сопряжены, то есть перекрытие экраном одной из сопряженных зон приведет к исчезновению второй, связанной с ней. Следовательно, для существенного снижения уровня отраженного от ОЭП излучения достаточно в местах локализации «блестящих зон» расположить три экрана, один из которых перекрывает центральную «блестящую зону», а два других размещены в областях локализации одной из парных периферийных «блестящих зон».

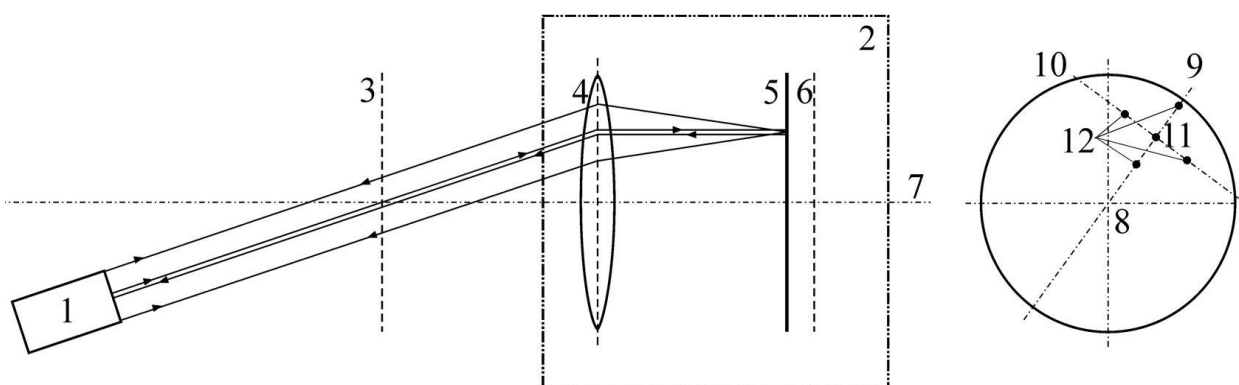


Рисунок 4 – Схема конфигурации «блестящих зон» при наклонном падении фронта зондирующего излучения на апертуру ОЭП, объектив которого обладает сферической аберрацией

Периферийные «зоны блеска» с центрами в точках h'_2, h'_3 , а также в точках $h'_{2\perp}, h'_{3\perp}$ являются взаимно сопряженными, то есть размещение экрана в одной из точек, входящих в пару, приведет к подавлению бликов отраженного излучения, связанных с обеими точками.



Таким образом, несмотря на наличие пяти зон блеска в плоскости апертуры ОЭС, для подавления всех бликов отраженного излучения будет достаточно трех экранов.

Расстояние между периферийными зонами в плоскости угла поворота равно α_0 будет уменьшаться по мере роста величины этого угла

$$h'_2 - h'_3 = 2r_{\text{ОЭС}} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a} - \frac{f^2}{r_{\text{ОЭС}}^2} \alpha_0^2} = 2 \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a}} \cdot \sqrt{1 + \frac{f^2 \Delta_a}{r_{\text{ОЭС}}^2 \Delta} \alpha_0^2} \approx 2 \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a}} \left(1 + \frac{f^2 \Delta_a}{2r_{\text{ОЭС}}^2 \Delta} \alpha_0^2 \right). \quad (21)$$

Для граничного значения угла $\alpha_0 < \pm \frac{r_{\text{ОЭС}}}{f} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a}}$ расстояние $h'_2 - h'_3$ будет в два раза меньше, чем аналогичное расстояние при $\alpha_0 = 0$ или расстояние $h'_{2\perp} - h'_{3\perp}$, которое не меняется в зависимости от угла поворота α_0 . При этом периферийная «зона блеска» h'_3 переместится в центр апертуры ОЭС, а центральная h'_1 и периферийная «зоны блеска» совпадут в точке с координатами $h'_1 = h'_2 = r_{\text{ОЭС}} \sqrt{\frac{\Delta_a}{\Delta}}$.

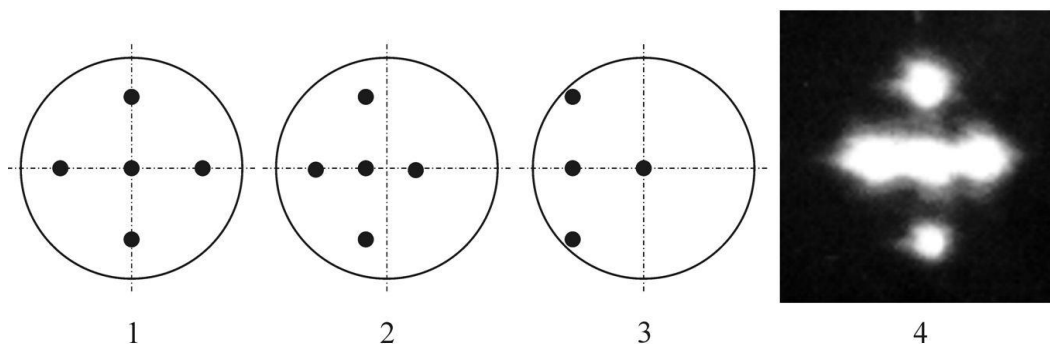


Рисунок 5 – Схема последовательных этапов эволюции конфигурации «блестящих зон» при изменении угла поворота α_0 и изображение «блестящих зон», полученное экспериментально

На рисунке 5 (где 1 – $\alpha_0 = 0$; 2 – $0 < \alpha_0 < \alpha_{0\text{max}}$; 3 – $\alpha_0 = \alpha_{0\text{max}} = \frac{r_{\text{ОЭС}}}{f} \sqrt{-\frac{\Delta}{\Delta_a}}$; 4 – экспериментально полученное изображение «зон блеска» на апертуре лоцируемого ОЭС) представлена схема последовательных этапов эволюции конфигурации «блестящих зон» при изменении угла поворота α_0 и изображение пяти «блестящих зон», полученное экспериментально.

Рассмотрим теперь размеры экранов, для снижения заметности ОЭС с абберациями объектива в условиях активной оптической локации. Размер экрана для центральной «блестящей зоны» определяется соотношением (4), так как она является смещенной на расстояние $h'_1 = f \alpha_0$ «блестящей зоной» для параксиального приближения. Размеры экранов в центрах периферийных «блестящих зон» могут быть оценены с использованием соотношений для параметров положения «блестящих зон», рассчитанных в [9]. Учитывая, что линейные размеры периферийных «блестящих зон» так же как и центральной уменьшаются обратно пропорционально дальности локации, то и для них на локационных трассах протяженностью более нескольких сотен метров можно рекомендовать использовать экраны с радиусом $r_s \geq f \sqrt{\lambda/2|\Delta|}$. Таким образом, три экрана с радиусом превышающим радиус первой зоны Френеля для центральной «блестящей зоны» могут обеспечить подавление бликов отраженного от ОЭС излучения при его локации на трассах



протяженностью более нескольких сотен метров. При этом потери энергии полезного сигнала не превысят 1,5 % для ОЭС с ЭПР $\sigma \approx 100 \text{ м}^2$ и 16 % для ОЭС с ЭПР $\sigma \approx 10^4 \text{ м}^2$.

Вывод. В условиях активной оптической локации ОЭС с когерентным отражением существует возможность принятия мер по подавлению бликов отраженного излучения путем экранирования «зон блеска» – локальных участков апертуры ОЭС, оказывающих определяющее влияние на формирование сигнала, принимаемого оптическим локатором. В зависимости от параметров оптической системы ОЭС и условий локации могут формироваться единственная «зона блеска» или система периферийных и центральной «зон блеска».

Единственная зона блеска формируется в большинстве случаев. Ее положение на апертуре может быть определено по данным о положении изображения излучающей апертуры оптического локатора. Размер экрана, который должен быть размещен в центре «зоны блеска» сопоставим с размером первой зоны Френеля сферической волны отраженного от ОЭС излучения в дальней зоне. Применение таких экранов обеспечит практически полное подавление блика отраженного ОЭС излучения при минимальных энергетических потерях полезного сигнала. Для ОЭС с ЭПР $\sigma \approx 100 \text{ м}^2$ потери составят около 0,5 %, а с ЭПР $\sigma \approx 10^4 \text{ м}^2$ – 5,5 %.

Наличие аберраций оптической системы ОЭС может приводить к возникновению в пределах апертуры ОЭС нескольких «зон блеска» – центральной и периферийных. Положение центральной «зоны блеска» определяются по данным о положении изображения излучающей апертуры оптического локатора, а положение периферийных – на основании данных предварительных исследований аберраций объектива ОЭС и углового положения изображения излучающей апертуры оптического локатора относительно оптической оси ОЭС. Учитывая сопряженность пар периферийных «блестящих зон» для подавления бликов отраженного излучения в этом случае достаточно трех локальных экранов с размерами сопоставимыми с размерами первой зоны Френеля сферической волны отраженной от ОЭС в области центральной «зоны блеска». В этом случае потери полезного сигнала не превысят для ОЭС с ЭПР $\sigma \approx 100 \text{ м}^2$ 1,5 %, а для ОЭС с ЭПР $\sigma \approx 10^4 \text{ м}^2$ – 16 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов: Монография / Ю.Л. Козирацкий, А.И. Афанасьева, А.И. Гревцев и др. / Под редакцией Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.
2. Попело В.Д., Фахуртдинов И.Р. Оптико-локационные характеристики объектов различной размерности // Метрология. 2012. № 7. С. 9–18.
3. Пат. 2703921 Российская Федерация, МПК G02В 26/04, G03В 11/04. Способ скрытия оптико-электронных приборов от лазерных локационных средств / Ю.Л. Козирацкий, П.Е. Кулешов [и др.]; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). 2018144048; заявл. 12.12.2018; опублик. 22.10.2019, Бюл. №30.
4. Попело В.Д. Активное оптическое дистанционное зондирование малоразмерных объектов с нелокальным отражением // Радиолокация. Навигация. Связь: сб. докладов XXII Международной научно-технической конференции (RLNC*2016) / НПФ «САКВУЕЕ» ООО, 2016. С. 1247–1256.
5. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
6. Джеррард А., Бёрч Д.М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978. 341 с.
7. Попело В.Д. Модель оптико-электронного средства как объекта оптической локации // Радиотехника. 2005. № 7. С. 102–104.
8. Born M., Wolf E. Principles of optics / seventh (expanded) edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p.



9. Попело В.Д., Проскурин Д.К., Нагалин А.В. Форма и положение в пространстве эффективных центров рассеяния при лазерном зондировании на трассах конечной протяженности малоразмерного объекта с нелокальным отражением // Радиотехника. № 8. 2018. С. 22–27.

REFERENCES

1. Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-`elektronnyh sredstv, ocenka parametrov ih signalov: Monografiya / Yu.L. Kozirackij, A.I. Afanas'eva, A.I. Grevcev i dr. / Pod redakciej Yu.L. Kozirackogo. M.: Radiotekhnika, 2015. 456 p.

2. Popelo V.D., Fahurtdinov I.R. Optiko-lokacionnye harakteristiki ob`ektov razlichnoj razmernosti // Metrologiya. 2012. № 7. pp. 9–18.

3. Pat. 2703921 Rossijskaya Federaciya, MPK G02B 26/04, G03B 11/04. Sposob skrytiya optiko-`elektronnyh priborov ot lazernyh lokacionnyh sredstv / Yu.L. Kozirackij, P.E. Kuleshov [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' VUNC VVS «VVA» (g. Voronezh). 2018144048; zayavl. 12.12.2018; opubl. 22.10.2019, Byul. № 30.

4. Popelo V.D. Aktivnoe opticheskoe distancionnoe zondirovanie malorazmernih ob`ektov s nelokal'nym otrazheniem // Radiolokaciya. Navigaciya. Svyaz': sb. dokladov XXII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (RLNC*2016) / NPF «SAKVUEE» OOO, 2016. pp. 1247–1256.

5. Kravcov Yu.A., Orlov Yu.I. Geometricheskaya optika neodnorodnyh sred. M.: Nauka, 1980. 304 p.

6. Dzherrard A., Berch D.M. Vvedenie v matrichnuyu optiku. M.: Mir, 1978. 341 p.

7. Popelo V.D. Model' optiko-`elektronnoho sredstva kak ob`ekta opticheskoy lokacii // Radiotekhnika. 2005. № 7. pp. 102–104.

8. Born M., Wolf E. Principles of optics / seventh (expanded) edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p.

9. Popelo V.D., Proskurin D.K., Nagalin A.V. Forma i polozhenie v prostranstve `effektivnyh centrov rasseyaniya pri lazernom zondirovanii na trassah konechnoj protyazhennosti malorazmernogo ob`ekta s nelokal'nym otrazheniem // Radiotekhnika. № 8. 2018. pp. 22–27.

© Попело В.Д., Проскурин Д.К., Кулешов П.Е., 2020

Попело Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Проскурин Дмитрий Константинович, кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Кулешов Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отдела, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, pekulesh@yandex.ru.