

УДК 623.62

## Многослойная прозрачная сфера с концентрической структурой слоев как детальная ложная оптическая цель для импульсных лазерных локаторов обнаружения оптико-электронных средств

Кулешов П. Е., Попело В. Д.

**Постановка задачи:** пассивные оптико-электронные средства являются объектами локации для локаторов оптического диапазона. Такие локаторы применяются как самостоятельно, так и в составе различных систем военного назначения, в том числе, в составе комплексов лазерного оружия. Противодействие лазерными локаторами и обеспечение скрытности отечественных оптико-электронных средств представляет собой актуальную задачу. Одним из направлений дезинформации информационных подсистем, использующих данные оптической локации, является применение ложных оптических целей. Ложные оптические цели различной конструкции могут не обеспечивать близость характеристик отражения характеристикам реальных (имитируемых) оптико-электронных средств. **Целью работы** является разработка математической модели формирования локационного отклика ложной оптической целью в виде многослойной прозрачной сферы и оценка принципиальной возможности создания таких ложных оптических целей с использованием оптических материалов со стандартными характеристиками. **Новизна работы** заключается в представлении ложной оптической цели в виде многослойной прозрачной сферы, имитирующей пространственную последовательность расположения основных отражающих поверхностей оптико-электронного средства и в математической модели ложной оптической цели, описывающая характер отражения от ее структурных поверхностей. **Результат:** на основе методов матричной оптики разработана математическая модель применительно к предлагаемой структуре ложной оптической цели, описывающая характер отражения в виде матриц преломляющих и отражающих поверхностей, разделенных промежутками сред с различными коэффициентами преломления. **Практическая значимость:** установленные закономерности позволяют количественно определить параметры ложной оптической цели, удовлетворяющие требованиям тождественности заданным параметрам отражения имитируемого оптико-электронного средства.

**Ключевые слова:** оптико-электронное средство, лазерный локатор, ложная оптическая цель, матрица перемещения, матрица отражения, матрица преломления, зондирующий импульс, длительность зондирующего импульса, эффективная площадь рассеяния.

### Введение

В настоящее время единственным реальным способом обнаружения пассивных оптико-электронных средств (ОЭС) представляет противоборствующей стороны является использование активных лазерных локаторов [1]. Такие лока-

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Кулешов П. Е., Попело В. Д. Многослойная прозрачная сфера с концентрической структурой слоев как детальная ложная оптическая цель для импульсных лазерных локаторов обнаружения оптико-электронных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 135-148. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-135-148

#### Reference for citation:

Kuleshov P. E., Popelo V. D. A multilayer transparent sphere with a concentric structure of layers as a detailed false optical target for pulsed laser locators of electro-optical devices. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 135-148 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-135-148

торы применяются как самостоятельно, так и в составе различных систем военного назначения, в том числе, в составе комплексов лазерного оружия [2-4]. Противодействие лазерными локаторами и обеспечение скрытности ОЭС представляет собой актуальную задачу.

Одним из направлений дезинформации информационных подсистем, использующих данные оптической локации, является применение ложных оптических целей (ЛОЦ) [5-8], в качестве которых могут выступать отражатели (рефлекторы) различного типа [9-11]. С развитием технологий генерации и приема импульсов оптического излучения пико- и фемтосекундной длительности [12], а также большой длительности, но с высокой крутизной фронтов, открывается возможность анализа «тонкой» структуры импульсных откликов ОЭС, формирования их сложных сигнатур – «дальномерно-яркостных портретов», несущих большой объем информации о внутренней структуре ОЭС для формирования признаков распознавания ОЭС локационных целей [13]. Поэтому ЛОЦ – отражатели простой конструкции, могут не обеспечивать близость их характеристик отражения подобным характеристикам реальных ОЭС [13]. В случае «сложного» по структуре отражающих поверхностей ОЭС необходимо учитывать при построении ЛОЦ вклад каждой из них в отраженный сигнал. В работе [6] предложена ЛОЦ, формирующая совокупный отраженный сигнал идентичный пространственным, энергетическим параметрам отражения элементов построения имитируемого ОЭС. Однако техническая реализация предлагаемой ЛОЦ достаточно сложная и требует использования высокотехнологических элементов. При этом ЛОЦ должны удовлетворять ряду дополнительных требований:

- иметь достаточно простую конструкцию (и меньшую стоимость) по сравнению с реальными ОЭС;
- обеспечивать надежный оптико-локационный отклик в широком секторе углов;
- обеспечивать временную структуру локационного отклика близкую к структуре отклика реального ОЭС, обусловленную характером и конструктивными особенностями отдельных элементов оптической системы (данное требование может быть присуще для лазерных локаторов, формирующих зондирующие импульсы сверхкороткой длительности [13]).

Первым двум требованиям в существенной мере удовлетворяют ЛОЦ в виде матриц элементарных отражателей, установленных на сферичной или многогранной основе [9-11], а также (наиболее «простая») – прозрачная сфера, заполненная средой с показателем преломления  $n$  [14]. Однако структура отклика отраженного лазерного излучения у таких ЛОЦ достаточно проста (формируется один импульс необходимой амплитуды). Кроме того, обеспечение большого ( $\sim 10^3 \dots 10^4 \text{ м}^2$ ) значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) ЛОЦ в виде прозрачной сферы возможно лишь при использовании в ее конструкции материала с высоким показателем преломления ( $n \sim 2$ ), что требует тщательного подбора материала [14]. На практике подобрать материал с необходимым

значением показателя преломления оказывается настолько сложно, что удовлетворить требование о сравнительно низкой стоимости ЛОЦ не удастся.

Формирование же временного отклика более сложной структуры, включающей несколько импульсов отраженного лазерного излучения, вообще невозможно с помощью ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы. Это может быть обеспечено за счет использования ЛОЦ в виде многослойной прозрачной сферы с концентрическими слоями материала с различными показателями преломления. К формированию системы импульсных откликов такой ЛОЦ приводит последовательное отражение зондирующего импульса от поверхностей раздела слоев. В настоящей работе рассмотрена двухслойная ЛОЦ (для лазерного излучения, распространяющегося внутри ЛОЦ) оптическая структура («сфера в сфере»).

Цель работы – разработка математической модели формирования локационного отклика ЛОЦ в виде многослойной прозрачной сферы и оценка принципиальной возможности создания таких ЛОЦ с использованием оптических материалов со стандартными характеристиками.

Так как при осуществлении локации на трассах реальной протяженности приемное устройство лазерного локатора регистрирует только ту часть отраженного ЛОЦ излучения, что распространяется в параксиальной области (в малом телесной угле отраженного излучения), то дальнейший анализ будет осуществлен с использованием математического аппарата геометрической оптики, опирающегося на матричный формализм [9], описывающий характер отражения в виде матриц преломляющих и отражающих поверхностей, разделенных промежутками сред с различными коэффициентами преломления.

## 1. Модель локационного отклика прозрачной сферы из однородного материала

Рассмотрим ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы (рис. 1).

Пусть внешняя среда – воздух с показателем преломления  $n_0 = 1$ . Опорная плоскость анализа – плоскость касательная поверхности сферы и перпендикулярная вектору нормали волнового фронта падающего излучения. Локационный отклик такой ЛОЦ представляет собой последовательность двух импульсов, обусловленных отражением от внешней и внутренней поверхности сферы. Матрицы преобразования параметров излучения в процессе таких отражений определяются следующими соотношениями [14]:

$$[M_1] = \begin{bmatrix} m_{11}^{(1)} & m_{12}^{(1)} \\ m_{21}^{(1)} & m_{22}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$[M_2] = \begin{bmatrix} m_{11}^{(2)} & m_{12}^{(2)} \\ m_{21}^{(2)} & m_{22}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n-4}{n} & -\frac{4R}{n} \\ \frac{2(n-2)}{nR} & \frac{n-4}{n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус сферы;  $m_{ij}^{(1)}, m_{ij}^{(2)}$  – элементы матриц  $[M_1]$  и  $[M_2]$  соответственно;  $i = 1, 2; j = 1, 2$ .



Рис. 1. Внешний вид макета ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы

Равенство элементов матриц (1) и (2), лежащих на главной диагонали, то есть выполнение условий  $m_{11}^{(1)} = m_{22}^{(1)}$  и  $m_{11}^{(2)} = m_{22}^{(2)}$ , свидетельствует о том, что эти матрицы характеризуют отражатель. Примечательно, что небольшим изменением положения опорной плоскости анализа таким, чтобы эта плоскость проходила через центр сферы, матрица (2) может быть преобразована к чрезвычайно простому виду [14]

$$[M'_2] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2(n-2)}{nR} & -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для определения энергетических параметров импульсов, отраженных ЛОЦ, важны элементы матрицы  $m_{21}^{(1)}, m_{21}^{(2)}$  матриц (1) и (2). С их использованием рассчитывают значения ЭПР ЛОЦ как [15]:

$$\sigma_1 = 4\pi\rho(m_{21}^{(1)})^{-2} = \frac{\pi R^2(n-1)^2}{(n+1)^2}; \quad (4)$$

$$\sigma_2 = 4\pi\tau^2\rho(m_{21}^{(2)})^{-2} = \frac{\pi n^2 R^2(n-1)^2}{(n-2)^2(n+1)^2}, \quad (5)$$

где  $\rho = (n-1)^2/(n+1)^2$  – коэффициент отражения границы раздела сред (поверхности сферы);  $\tau = 1 - \rho$  – коэффициент пропускания оптической системы ЛОЦ (предполагается, что энергетические потери обусловлены только отражением на границе раздела, а собственное поглощение материала сферы отсутствует).

Следует обратить внимание на то, что в структуре локационного отклика прозрачной сферы реально присутствуют и другие импульсы, обусловленные многократным отражением излучения внутри сферы. Однако энергия этих импульсов мала. Она пропорциональна нечетным степеням коэффициента отражения, который обычно составляет величину нескольких процентов. Например, при значении  $n = 1,6$  коэффициент отражения  $\rho \approx 0,05$ , а при  $n = 2$  –  $\rho \approx 0,11$ . То есть импульс двукратно отраженного излучения более, чем на три порядка меньше по интенсивности однократно отраженного импульса. Вследствие этого

составляющие локационного отклика, обусловленные многократным отражением внутри ЛОЦ, в дальнейшем не рассматриваются.

Из соотношения (5) следует, что отклик внутренней поверхности сферы в  $n^2/(n-2)^2$  раз больше, чем внешней, и возрастает по мере увеличения показателя преломления материала сферы, достигая максимального значения для материала с  $n=2$ . В этом случае прозрачная сфера выступает как идеальный отражатель, у матрицы передачи которого элемент  $m_{21}^{(2)} = 0$ .

Подавляющее число оптических материалов, прозрачных в видимой и инфракрасной областях спектра [16], имеют значения показателя преломления от 1,5 до 1,8 и только несколько марок сверхтяжелого флинта обладают показателем близким к 2 (СТФ2 – 1,94, СТФ3 – 2,17, СТФ11 – 2,06).

В таблице 1 представлены результаты расчета по формулам (4) и (5) ЭПР ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы радиуса 0,05 м для типовых значений показателя преломления материала сферы.

Таблица 1 – ЭПР ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы

Показатель преломления, $n$	1,5	1,8	1,94	2,06	2,17
ЭПР внешней поверхности ( $\sigma_1$ ), м <sup>2</sup>	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$6,44 \cdot 10^{-4}$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
ЭПР внутренней поверхности ( $\sigma_2$ ), м <sup>2</sup>	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-1}$	1,02	$1,78 \cdot 10^{-1}$

Если принять условие  $\sigma^2 \sim 10^3 \dots 10^4 \text{ м}^2$ , то есть ЭПР ЛОЦ должна быть соизмерима с ЭПР реального ОЭС, то нужные значения показателя преломления материала сферы лежат в диапазонах  $1,98 < \sigma_2 < 1,998$  и  $2,002 < \sigma_2 < 2,02$ . Если же  $1,998 < \sigma_2 < 2,002$ , то ЭПР ЛОЦ может оказаться чрезмерной.

Результаты количественной оценки уровня отраженного излучения от ЛОЦ в виде однородной сферы позволяют утверждать, что локационный отклик, обусловленный отражением от внутренней поверхности сферы, заметно (на несколько порядков) превышает отклик за счет отражения от внешней поверхности. Увеличение отклика от внешней поверхности за счет увеличения диаметра сферы нецелесообразно. Поэтому в практически значимых случаях отражением от внешней поверхности такой ЛОЦ можно пренебречь. Локационный отклик, обусловленный отражением от внутренней поверхности сферы, может достигать уровня отклика от реального ОЭС только при условии использования материала с показателем преломления практически равного 2. Отличия не должны превышать 1%. Эти обстоятельства свидетельствуют о чрезвычайно узком «окне возможностей» для практического применения ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы.

## 2. Модель локационного отклика многослойной прозрачной сферы с концентрической структурой слоев

На рис. 2 представлена схема структуры многослойной прозрачной сферы с концентрической структурой слоев. В простейшем случае такая ЛОЦ включает внутреннюю сферу радиуса  $R_2$ , заполненную прозрачной средой с показате-

лем преломления  $n_2$ , окруженную шаровым слоем среды с показателем преломления  $n_1$  и внешним радиусом  $R_1 > R_2$ . Опорная плоскость анализа, как и в случае однородной сферы – плоскость касательная внешней сферической поверхности и перпендикулярная вектору нормали волнового фронта падающего излучения. В процессе отражения от многослойной прозрачной сферы формируется система импульсных откликов, связанных с соответствующими границами раздела сред, составляющих эту сферу. В рассматриваемом случае таких границ – четыре (обозначены соответствующими номерами на рис. 2). Как и в случае однородной сферы, импульсы в составе результирующего отклика ЛОЦ, обусловленные многократным отражением, не учитываются в силу их низкой интенсивности.

Матрицы преобразования параметров лазерного излучения в процессе отражения от внешней поверхности многослойной сферы определяется следующим соотношением:

$$[M_{s1}] = \begin{bmatrix} m_{11}^{(s1)} & m_{12}^{(s1)} \\ m_{21}^{(s1)} & m_{22}^{(s1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а ЭПР внешней поверхности ЛОЦ:

$$\sigma_{s1} = 4\pi\rho_1(m_{21}^{(s1)})^{-2} = \frac{\pi R_1^2 (n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2}, \quad (7)$$

где  $\rho_1 = (n_1 - 1)^2 / (n_1 + 1)^2$  – коэффициент отражения внешней поверхности многослойной сферы.

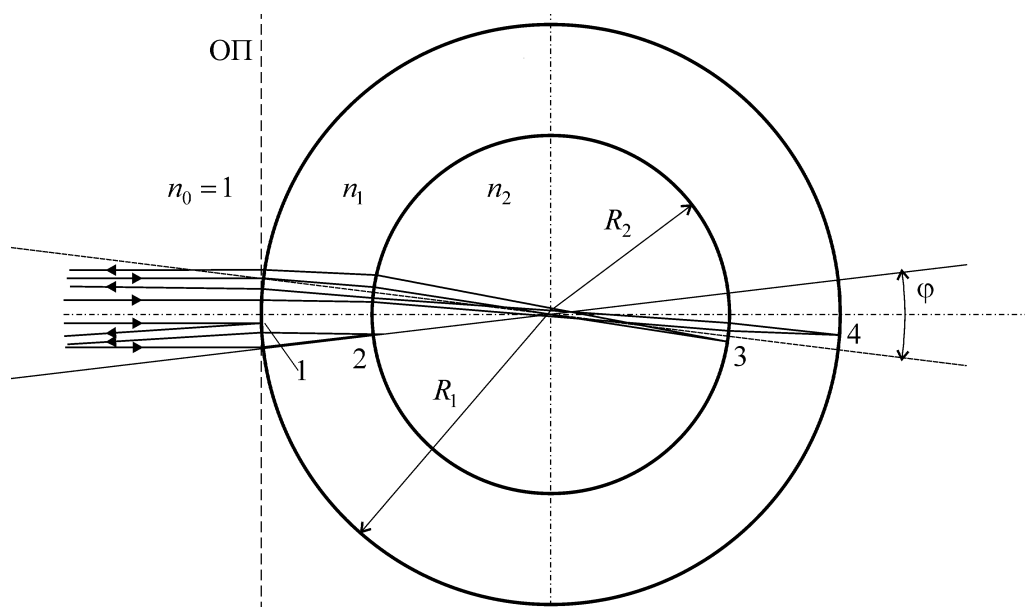


Рис. 2. Схема ЛОЦ в виде многослойной прозрачной сферы с концентрической структурой слоев: 1-4 – номера отражающих поверхностей;  $\varphi$  – угол в параксиальной области, в пределах которого отраженное излучение перехватывается апертурой лазерного локатора

При выполнении условий  $R_1 = R$  и  $n_1 = n$  матрица (6) тождественна матрице (1), а соотношение (7) – соотношению (4).

Матрица преобразования параметров лазерного излучения при отражении от первой внутренней границы раздела сред – внешней поверхности внутренней сферы радиуса  $R_2 < R_1$  – имеет вид

$$\begin{aligned}
 [M_{s_2}] &= \begin{bmatrix} m_{11}^{(S_2)} & m_{12}^{(S_2)} \\ m_{21}^{(S_2)} & m_{22}^{(S_2)} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n_1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n_1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{2}{n_1} + \frac{2R_1}{n_1 R_2} & \frac{2R_1(R_1 - R_2)}{n_1 R_2} \\ \frac{2}{R_1} + \frac{2}{n_1 R_2} - \frac{2}{n_1 R_1} & 1 - \frac{2}{n_1} + \frac{2R_1}{n_1 R_2} \end{bmatrix}. \tag{8}
 \end{aligned}$$

Выберем положение опорной плоскости анализа, при котором матрица (8) имеет наиболее простой вид. Для этого опорную плоскость необходимо сместить относительно исходного положения на расстояние [9]

$$d_2 = -\frac{m_{11}^{(S_2)} + 1}{m_{21}^{(S_2)}} = -R_1. \tag{9}$$

Таким образом, если опорная плоскость выбрана так, чтобы она проходила через центр многослойной сферы, то матрица отражения от первой внутренней поверхности примет вид

$$[M'_{s_2}] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2}{R_1} + \frac{2}{n_1 R_2} - \frac{2}{n_1 R_1} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2}{R_1} \left( \frac{(n_1 - 1) + R_1/R_2}{n_1} \right) & -1 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Так как составляющая эффективной площади рассеяния ЛОЦ, связанная с отражением от второй поверхности раздела, определяется единственным элементом матрицы (10)  $m_{21}^{(S_2)}$ , то

$$\sigma_{s_2} = 4\pi\tau_{12}^2\rho_2(m_{21}^{(S_2)})^{-2} = \frac{16\pi R_1^2 n_1^4 (n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^6 (n_1 - 1 + R_1/R_2)^2 \pi R_1^2 (n_1 - 1)^2}, \tag{11}$$

где  $\rho_2 = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$  – коэффициент отражения первой внутренней границы раздела сред (поверхности внутренней сферы);  $\tau_{12} = 1 - \rho_1 = 4n_1 / (n_1 + 1)^2$  – коэффициент пропускания оптического слоя среды между внешней поверхностью и первой внутренней поверхностью многослойной сферы. Здесь, как и случае ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы, предполагается, что энергетические потери обусловлены только отражением на границах раздела, а собственное поглощение материалов сферы отсутствует.

Сравнивая вклады внешней и первой внутренней поверхности, получим

$$\frac{\sigma_{s_2}}{\sigma_{s_1}} = \frac{16n_1^4 (n_2 - n_1)^2 (n_1 + 1)^2}{(n_2 + n_1)^6 (n_1 - 1 + R_1/R_2)^2 (n_1 - 1)^4}. \tag{12}$$

Заметный вклад первой внутренней поверхности раздела сред в формирование локационного отклика ЛОЦ будет в том случае, если элемент матрицы отражения  $m_{21}^{(S2)} \rightarrow 0$ . Однако в реальности всегда  $n_1 \geq 1$ ,  $R_1 > R_2$ . Поэтому  $n_1 - 1 + R_1/R_2 \neq 0$ . Некоторая возможность увеличения составляющей ЭПР ЛОЦ  $\sigma_{s2}$  заключается в уменьшении значения  $n_1 - 1$ .

Матрица преобразования параметров лазерного излучения при отражении от второй внутренней границы раздела сред – внутренней поверхности внутренней сферы – имеет вид

$$\begin{aligned}
 [M_{s3}] &= \begin{bmatrix} m_{11}^{(S3)} & m_{12}^{(S3)} \\ m_{21}^{(S3)} & m_{22}^{(S3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_1-1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{2R_2}{n_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2n_2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{2R_2}{n_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_1-1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{2}{n_1} + \frac{2R_1}{n_1R_2} - \frac{4R_1}{n_2R_2} & -\frac{2R_1}{n_1} + \frac{2R_1^2}{R_2} \left( \frac{1}{n_1} - \frac{2}{n_2} \right) \\ \frac{2}{n_1R_2} - \frac{4}{n_2R_2} - \frac{2}{n_1R_1} + \frac{2}{R_1} & 1 - \frac{2}{n_1} + \frac{2R_1}{n_1R_2} - \frac{4R_1}{n_2R_2} \end{bmatrix}. \tag{13}
 \end{aligned}$$

Выберем положение опорной плоскости анализа, при котором матрица (13) имеет наиболее простой вид. Для этого опорную плоскость необходимо сместить относительно исходного положения на расстояние

$$d_3 = -\frac{m_{11}^{(S3)} + 1}{m_{21}^{(S3)}} = -R_1. \tag{14}$$

Таким образом, как и в случае отражения от второй поверхности многослойной сферы, выбор опорной плоскости, проходящей через центр сферы, приводит к тому, что матрица отражения третьей поверхности примет вид

$$[M'_{s3}] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2}{R_1} \left( \frac{n_1-1}{n_1} + \frac{R_1(n_2-2n_1)}{n_1n_2R_2} \right) & -1 \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Составляющая эффективной площади рассеяния ЛОЦ, связанная с отражением от третьей поверхности раздела, определяется единственным элементом матрицы (15)  $m_{21}^{(S3)}$ , тогда

$$\sigma_{s3} = 4\pi\tau_{13}^2\rho_3(m_{21}^{(S3)})^{-2} = \frac{16\pi n_1^4 n_2^3 (n_2 - n_1)^2 R_1^2 R_2^2}{(n_1 + 1)^2 (n_2 + n_1)^4 [n_2 R_2 (n_1 - 1) + R_1 (n_2 - 2n_1)]^2}, \tag{16}$$

где  $\rho_3 = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$  – коэффициент отражения второй внутренней границы раздела сред (внешней поверхности внутренней сферы);  $\tau_{13} = (1 - \rho_1)(1 - \rho_2) = 16n_1^2 n_2 / (n_1 + 1)^2 (n_2 + n_1)^2$  – коэффициент пропускания оптической среды между внешней поверхностью и второй внутренней поверхностью многослойной сферы. Здесь, как и в случае ЛОЦ в виде однородной прозрачной сферы, предполагается, что энергетические потери обусловлены только отра-



жением на границах раздела, а собственное поглощение материалов сферы отсутствует.

Из соотношения (16) следует, что значение  $\sigma_3$  заметно превысит значение  $\sigma_1$ , если выполняется условие  $n_2 R_2 (n_1 - 1) + R_1 (n_2 - 2n_1) \rightarrow 0$ . Так как всегда  $n_1 > 1$ , а  $R_2 < R_1$ , то  $n_2 > 2$ . Например, при  $R_2/R_1 = 0,9$  и  $n_1 = 1,3$  значение показателя преломления материала внутренней сферы составит  $n_2 \sim 2,15$ . Если же радиус внутренней сферы уменьшить до значения  $R_2 = 0,1R_1$  при том же значении  $n_1 = 1,3$ , то значение показателя преломления материала внутренней сферы должно быть увеличено и составит  $n_2 \sim 2,54$ . Увеличение значения показателя преломления материала внешнего слоя потребует еще большего увеличения показателя преломления внутренней сферы. Например, при  $R_2/R_1 = 0,9$  и  $n_1 = 1,8$  показатель преломления внутренней сферы должен достигать значений близких к  $n_2 \sim 2,57$ , а при  $R_2 = 0,1R_1$  и  $n_1 = 1,8$  –  $n_2 \sim 3,45$ .

Матрица преобразования параметров лазерного излучения при отражении от внутренней границы внешней поверхности сферы – имеет вид

$$\begin{aligned}
 [M_{s4}] &= \begin{bmatrix} m_{11}^{(S4)} & m_{12}^{(S4)} \\ m_{21}^{(S4)} & m_{22}^{(S4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_1-1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\times \begin{bmatrix} 1 & \frac{2R_2}{n_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2n_1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{2R_2}{n_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_1-R_2}{n_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_1-1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{4}{n_1} + \frac{4R_1}{n_1 R_2} - \frac{4R_1}{n_2 R_2} & -\frac{4R_1}{n_1} + \frac{4R_1^2}{R_2} \left( \frac{4n_1 - 4n_2}{n_1 n_2} \right) \\ \frac{4}{n_1 R_2} - \frac{4}{n_2 R_2} - \frac{4}{n_1 R_1} + \frac{2}{R_1} & 1 - \frac{4}{n_1} + \frac{4R_1}{n_1 R_2} - \frac{4R_1}{n_2 R_2} \end{bmatrix}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Как и ранее, путем переноса положения опорной плоскости в центр сферы преобразуем матрицу (17) к более простому виду

$$[M'_{s4}] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{4}{n_1 R_2} - \frac{4}{n_2 R_2} - \frac{4}{n_1 R_1} + \frac{2}{R_1} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2}{R_1} \left( \frac{2R_1}{n_1 R_2} - \frac{2R_1}{n_2 R_2} - \frac{2}{n_1} + 1 \right) & -1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Составляющая эффективной площади рассеяния ЛОЦ  $\sigma_4$ , связанная с отражением от четверной поверхности раздела, определяется единственным элементом матрицы (18)  $m_{21}^{(S4)}$ , тогда

$$\sigma_{s4} = 4\pi\tau_{14}^2 \rho_4 (m_{21}^{(S4)})^{-2} = \frac{4096 \pi R_1^2 R_2^2 (n_1 - 1)^2 n_1^4 n_2^3}{[2R_1(n_2 - n_1) - n_2 R_2(2 - n_1)]^2 (n_1 + 1)^6 (n_2 + n_1)^8}, \quad (19)$$

где  $\rho_4 = (n_1 - 1)^2 / (n_1 + 1)^2$  – коэффициент отражения четвертой границы раздела сред (внешней поверхности многослойной сферы);  $\tau_{14} = (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)(1 - \rho_3) =$

$= 64n_1^3 n_2^2 / (n_1 + 1)^2 (n_2 + n_1)^4$  – коэффициент пропускания и излучения между первой и четвертой поверхностями раздела многослойной среды. Здесь, как и ранее, предполагается, что энергетические потери обусловлены только отражением на границах раздела, а собственное поглощение материалов сферы отсутствует.

Из соотношения (19) следует, что значение  $\sigma_4$  заметно превысит значение  $\sigma_1$ , если выполняется условие  $2R_1(n_2 - n_1) - n_2 R_2(2 - n_1) \rightarrow 0$ . Например, при  $R_2/R_1 = 0,9$  и  $n_1 = 1,3$  значение показателя преломления материала внутренней сферы составит  $n_2 \sim 1,9$ . Если же радиус внутренней сферы уменьшить до значения  $R_2 = 0,1R_1$  при том же значении  $n_1 = 1,3$ , то значение показателя преломления материала внутренней сферы составит  $n_2 \sim 1,34$ . Увеличение значения показателя преломления материала внешнего слоя потребует также и некоторого увеличения показателя преломления внутренней сферы. Например, при  $R_2/R_1 = 0,9$  и  $n_1 = 1,8$  показатель преломления внутренней сферы должен достигать значений близких к  $n_2 \sim 1,97$ , а при  $R_2 = 0,1R_1$  и  $n_1 = 1,8$  –  $n_2 \sim 1,82$ .

Таким образом, использование двухслойной прозрачной сферы в качестве ЛОЦ позволяет обеспечить высокое значение  $\sigma_4$  даже в случае использования материалов с умеренным показателем преломления без использования сред с уникальными оптическими свойствами.

### Выводы

Применение ЛОЦ в виде прозрачной сферы позволяет обеспечить «всеракурсную» защиту ОЭС в условиях применения противоборствующей стороны лазерных локаторов. Однако простейшие по конструкции однослойные прозрачные среды для воспроизведения значений ЭПР характерных для типовых ОЭС, требуют использования уникальных оптических материалов с показателем преломления близким к 2.

Этот недостаток ЛОЦ может быть преодолен путем использования многослойных прозрачных сфер. Двухслойная сфера с концентрической структурой слоев («сфера в сфере») обеспечивает высокий уровень отражения, подобный уровню отражения реальных ОЭС, даже в случае использования оптических материалов с ординарными оптическими свойствами ( $n \sim 1,3 \dots 1,8$ ). При этом возможность тонкой «регулировки» воспроизводимого значения ЭПР обеспечивается как выбором показателя преломления слоев, так и путем подбора толщины этих слоев (радиусов внешней и внутренней сферы).

Применение многослойных прозрачных сфер в качестве ЛОЦ обеспечивает еще один положительный эффект, который может быть использован для борьбы с оптическими (лазерными) локаторами, формирующими зондирующие импульсы сверхкороткой длительности. Локационный отклик такой ЛОЦ имеет многоимпульсную временную структуру близкую к структуре отклика реального ОЭС, обусловленную характером и конструктивными особенностями отдельных элементов оптической системы объектива этого средства.

## Литература

1. Борейшо В. А., Ключков Д. В., Коняев М. А. Никулин Е. Н. Военные применения лазеров. СПб.: Издательство Балтийский государственный технический университет, 2015. – 103 с.
2. Аполлонов В. В. Лазерное оружие: проблемы и перспективы // Научное обозрение. 2016. № 2 (24). С. 33-41.
3. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304
4. Фомкин Н. В. Разработка в США комплексов лазерного оружия // Зарубежное военное обозрение. 2017. № 4. С. 34-37.
5. Кулешов П. Е., Глушков А. Н., Марченко А. В. Классификация технических методов (способов) защиты оптико-электронных средств от лазерного комплекса функционального поражения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 10. С. 72-80.
6. Козирацкий Ю. Л., Глушков А. Н., Кулешов П. Е., Алабовский А. В., Лобов В. А., Чернышов П. В., Нагалин Д. А., Мамаджанян Е. А. Способ имитации оптико-электронного средства // Патент на изобретение RU 2712940 С1, опубл. 03.02.2020, бюл. № 4. – URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/712/940/ИЗ-02712940-00001/document.pdf> (дата обращения 24.03.2022).
7. Козирацкий Ю. Л., Глушков А. Н., Кулешов П. Е., Дробышевский Н. В., Прохоров Д. В. Способ формирования ложной оптической цели // Патент на изобретение RU 2698466 С1, опубл. 27.08.2019, бюл. № 24. – URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/698/466/ИЗ-02698466-00001/document.pdf> (дата обращения 24.03.2022).
8. Козирацкий Ю. Л., Донцов А. А., Иванцов А. В., Козирацкий А. Ю., Кусакин О. В., Кущев С. С., Лысиков В. Ф., Мазиллов С. Л., Паринов М. Л., Прохоров Д. В. Модели пространственного и частотного поиска. Монография / под ред. Ю. Л. Козирацкого. – М.: Издательство «Радиотехника», 2014. – 344 с.
9. Храпов А. Г., Костюнин Н. Н., Егоров О. М., Сукманюк Ю. Н., Егошин С. А., Щепин Р. А. Ретрорефлекторная сферическая система // Патент на изобретение RU 2616439 С1, опубл. 14.04.2017, бюл. № 11. – URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/698/466/ИЗ-02698466-00001/document.pdf> (дата обращения 24.03.2022).
10. Соколов А. Л., Акентьев А. С., Першин А. В., Садовников М. А., Союзова Н. М., Шаргородский В. Д. Имитационный отражатель // Патент на изобретение RU 2755289 С1, опубл. 14.09.2021, бюл. № 26. – URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/698/466/ИЗ-02698466-00001/document.pdf> (дата обращения 24.03.2022).
11. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М., Городничев В. А., Стрелков Б. В. Основы импульсной лазерной локации. – М.: Московский государственный технологический университет имени Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.

12. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов и их применение. Долгопрудный: Интеллект, 2012. – 248 с.
13. Попело В. Д., Кулешов П. Е., Проскурин Д. К., Чернухо И. И. Модель оптико-электронного средства в условиях его активного импульсного лазерного зондирования как объекта с нелокальным отражением // Радиотехника. 2022. № 2. С. 13-21.
14. Джеррард А., Бёрч Д. М. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 341 с.
15. Попело В. Д., Козирацкий Ю. Л. Методы экспериментальных исследований характеристик отражения оптико-электронных средств. – Воронеж: 5 ЦНИИИ, 1998. – 186 с.
16. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.

### References

1. Borejsho V. A., Klochkov D. V., Konyaev M. A., Nikulin E. N. *Voennye primeneniya lazerov* [Military applications of lasers. Saint Petersburg, House of the Baltic State Technical University Publ., 2015. 103 p. (in Russian).
2. Apollonov V. V. Lazernoe oruzhie: problemy i perspektivy [Laser weapons: problems and prospects]. *Scientific survey*, 2016, no. 2 (24), pp. 33-41 (in Russian).
3. Makarenko S. I. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 4. Functional Destroying with Microwave and Laser Weapons. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 122-157 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304
4. Fomkin N. V. Razrabotka v SSHA kompleksov lazernogo oruzhiya [Development complexes of laser weapon in the USA]. *Foreign Military Review*, 2017, no. 4, pp. 34-37 (in Russian).
5. Kuleshov P. E., Glushkov A. N., Marchenko A. V. Klassifikaciya tekhnicheskikh metodov (sposobov) zashchity optiko-elektronnyh sredstv ot lazernogo kompleksa funkcional'nogo porazheniya [Classification of technical methods (methods) of protection of electro-optical devices from a laser complex of functional damage]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2019, no. 10, pp. 72-80 (in Russian).
6. Kozirackij Yu. L., Glushkov A. N., Kuleshov P. E., Alabovskij A. V., Lobov V. A., Chernyshov P. V., Nagalin D. A., Mamadzhanyan E. A. *Sposob imitacii optiko-elektronnogo sredstva* [Method of imitation of electro-optical devices]. Patent Russia, no. 2712940. 2020.
7. Kozirackij Yu. L., Glushkov A. N., Kuleshov P. E., Drobyshevskij N. V., Prokhorov D. V. *Sposob formirovaniya lozhnoj opticheskoy celi* [Method of forming a complex optical target]. Patent Russia, no. 2698466. 2019.
8. Kozirackij Yu. L., Doncov A. A., Ivancov A. V., Kozirackij A. Yu., Kusakin O. V., Kushchev S. S., Lysikov V. F., Mazilov S. L., Parinov M. L., Prohorov D. V. *Modeli prostranstvennogo i chastotnogo poiska. Monografiya* [Models of spatial and frequency search. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 344 p. (in Russian).

9. Khrapov A. G., Kostyunin N. N., Egorov O. M., Sukmanyuk Yu. N., Egoshin S. A., Shchepin R. A. *Retroreflektornaya sfericheskaya sistema* [Imitation reflector]. Patent Russia, no. 2755289. 2021.

10. Sokolov A. L., Akentev A. S., Pershin A. V., Sadovnikov M. A., Soyuzova N. M., Shargorodskij V. D. *Imitacionnyj otrazhatel'* [Retroreflective spherical system]. Patent Russia, no. 2616439. 2022.

11. Kozintsev V. I., Belov M. L., Orlov V. M., Gorodnichev V. A., Strelkov B. V. *Osnovy impul'snoj lazernoj lokacii* [Fundamentals of pulsed laser location]. Moscow, Bauman Moscow State Technological University Publ., 2006. 512 p. (in Russian).

12. Kryukov P. G. *Lazery ul'trakorotkih impul'sov i ih primeneniye. Dolgoprudnyj* [Ultrashort pulse lasers and their application]. Dolgoprudny, Intelligence Publ., 2012. 248 p. (in Russian).

13 Popelo V. D., Kuleshov P. E., Proskurin D. K., Chernuxa I. I. Model' optiko-elektronnogo sredstva v usloviyah ego aktivnogo impul'snogo lazernogo zondirovaniya kak ob'ekta s nelokal'nym otrazheniem [Model of an electro-optical devices in the conditions of its active pulsed laser sounding as an object with a non-local reflection]. *Radiotekhnika*, 2022, no. 2, pp. 13-21 (in Russian).

14. Dzherrard A., Byorch D. M. *Vvedenie v matrichnuyu optiku* [Introduction to matrix optics]. Moscow, Mir Publ., 1978. 341 p. (in Russian).

15. Popelo V. D., Koziraczkiy Yu. L. *Metody eksperimental'nyh issledovaniy harakteristik otrazheniya optiko-elektronnnyh sredstv* [Methods of experimental studies' characteristics of reflection of electro-optical devices]. Voronezh, 5th Central Research Testing Institute Publ., 1998. 186 p. (in Russian).

16. Shreder G., Trajber X. *Tekhnicheskaya optika* [Technical optics]. Moscow, Technosphere Publ., 2006. 424 p. (in Russian).

Статья поступила 13 апреля 2022 г.

### Информация об авторах

*Кулешов Павел Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент. Начальник отдела Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Область научных интересов: информационный конфликт оптико-электронных систем. E-mail: pekulesh@yandex.ru

*Попело Владимир Дмитриевич* – доктор технических наук, старший научный сотрудник. Ведущий научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: информационный конфликт оптико-электронных систем. E-mail: popelovd@gmail.com.

Адрес: 394064, Россия, Воронеж, ул. Старых большевиков 54а.

## A multilayer transparent sphere with a concentric structure of layers as a detailed false optical target for pulsed laser locators of electro-optical devices

P. E. Kuleshov, V. D. Popelo

**Purpose.** *Passive electro-optical devices are objects of location for optical radars. Such locators are used both independently and as part of various military systems including as part of laser weapons systems. Counteracting of laser locators and ensuring the secrecy of domestic optoelectronic devices is an urgent task. One of the directions of misinformation of information subsystems using data of optical location is the use of false optical targets. False optical targets of various designs may not ensure the closeness of the reflection characteristics to the characteristics of real (simulated) electro-optical devices.* **Methods.** *Development of a mathematical model of the formation of the location response of a false optical target in the form of a multilayer transparent sphere and to assess the fundamental possibility of creating such false optical targets using optical materials with standard characteristics.* **Novelty.** *Consists in the representation of a false optical target in the form of a multilayer transparent sphere simulating the spatial sequence of the main specular surface`s the electro-optical devices and in a mathematical model of a false optical target describing the nature of reflection from its structural surfaces.* **Results.** *Based on the methods of matrix optics a mathematical model in relation to the proposed structure of a false optical target describing the nature of reflection in the form of matrices of refractive and reflecting surfaces separated by gaps of media with different refractive indices is developed.* **Practical relevance.** *The established regularities make it possible to quantitatively determine the parameters of a false optical target meeting the requirements of identity to the given reflection characteristics of the simulated electro-optical devices.*

**Key words:** *electro-optical devices, laser locator, false optical targets, matrix of displacement, matrix of reflection, matrix of refraction, probing pulse, duration of probing pulse, effective scattering cross section.*

### Information about Authors

*Pavel Evgenevich Kuleshov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Head of a department of Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: information conflict for optical-electronic systems. E-mail: pekulesh@yandex.ru

*Popelo Vladimir Dmitrievich* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Senior Research Officer. Leading research assistant of Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: information conflict for optical-electronic systems. E-mail: popelovd@gmail.com

Address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks street 54A.