

Моделирование протяженных трасс при калибровке рабочих мер эффективной площади рассеяния в оптическом диапазоне длин волн

В. Д. ПОПЕЛО*, Д. К. ПРОСКУРИН**, И. Р. ФАХУРТДИНОВ***

* Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, e-mail: popelovd@gmail.com

** Воронежский архитектурно-строительный университет, Воронеж, Россия, e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

*** Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: ildar-215@mail.ru

Обоснован принцип построения физических моделей (имитаторов) протяженных трасс распространения оптического (лазерного) излучения в свободном пространстве. Предложен вариант построения оптической системы имитатора, предназначенного для калибровки мер эффективной площади рассеяния с минимальными погрешностями в лабораторных условиях.

Ключевые слова: лазерная локация, эффективная площадь рассеяния, рабочая мера, калибровка, имитатор трассы.

The principle of creation of physical models (simulators) of extended routes of distribution of optical (laser) radiation dissemination in free space is proved. The version of construction of the simulator optical system intended for use at calibration of measures of the scattering effective area with minimum errors in laboratory conditions is suggested.

Key words: laser location, scattering effective area, working measure, calibration, similarity, route simulator.

Важной составной частью технологий создания систем лазерной локации и разработки мер, обеспечивающих управление свойствами объектов как оптико-локационных целей, являются экспериментальные исследования (измерения) характеристик отражения объектов и фоновых образований в условиях активного зондирования монохроматическим частично когерентным лазерным излучением. Такие измерения обычно проводят в натурных условиях на открытых протяженных трассах методом сравнения с мерой [1, 2]. В качестве рабочих мер (вне зависимости от размерности исследуемого объекта¹) обычно применяют сегменты сферических зеркальных поверхностей с известными фиксированными значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР) или световозвращатели различной конструкции, допускающие возможность перестройки воспроизводимого значения этой площади. Отражатели обоих типов позволяют надежно хранить и воспроизводить значение ЭПР и достаточно удобны в эксплуатации, однако требуют для правильной калибровки осуществления экспериментальных процедур сравнения с эталонными мерами путем лазерного зондирования на больших дистанциях. При этом необходимая протяженность трасс возрастает по мере увеличения воспроизводимого мерой значения ЭПР. Минимальную дальность калибровки не удастся радикально уменьшить даже используя достаточно сложные приемы сравнения значений ЭПР мер в ближней зоне оптической (лазерной) локации [4].

¹ В зависимости от соотношений между размерами объекта и элемента разрешения локатора все оптико-локационные цели могут быть отнесены к одному из четырех классов: точечных (нульмерных), линейных (одномерных), площадных (двумерных), объемных (трехмерных) [3].

Идея подхода, предлагаемого в данной статье, заключается в том, чтобы заменить измерительную трассу значительной протяженности ее компактной физической моделью — имитатором, сохранив все остальные составляющие натурального эксперимента: реальные измерительный лазерный локатор и объекты локации (калибруемую рабочую и эталонную меры). Задача построения (синтеза) имитатора трассы распространения лазерного излучения в обобщенном виде может быть сформулирована следующим образом.

Пусть $W_0 = (W_{01}, \dots, W_{0n})^T$, $W_L = (W_{L1}, \dots, W_{Ln})^T$, $W_M = (W_{M1}, \dots, W_{Mn})^T$ — обобщенные векторы параметров оптического излучения в начальной плоскости ($L = 0$), после прохождения реальной трассы длиной L и ее имитатора, соответственно; W_{0i} , W_{Li} , W_{Mi} — частные параметры оптического излучения; $i = 1, n$. Связь векторов W_0 , W_L , W_M определяется соотношениями $W_L = A_L W_0$, $W_M = A_M W_0$, где A_L , A_M — операторы преобразования параметров излучения на трассе длиной L , лежащей в свободном пространстве, и ее имитатором. Необходимо для любого начального набора параметров W_0 и заданного вида оператора A_L определить вид оператора A_M (структуру и параметры имитатора), обеспечивающего выполнение условия $W_L = W_M$ при ограничении $L_M \ll L$, где L_M — характерный размер имитатора.

Возможные решения задачи будем искать среди множества оптических систем, структура которых включает в качестве базового элемента отрезок модельной среды, физически подобной реальному каналу — отрезку свободного пространства длиной L . В этом случае оператор A_M может быть представлен как $A_M = E^{-1} A_n E$, где A_n — оператор преобразования параметров излучения в системе, физически подоб-

ной реальной; E, E^{-1} — оператор преобразования параметров излучения при переходе из реальной в систему ей физически подобную и оператор обратного такого преобразования. С учетом функционального назначения создаваемого имитатора достаточно, если указанные выше требования будут выполняться в ограниченной области пространства, соизмеримой с размерами апертур измерительного лазерного локатора, калибруемой рабочей и эталонной мер.

Чтобы перейти от операторной записи задачи к соотношениям, связывающим физические величины, характерные для процесса распространения оптического излучения, рассмотрим комплексную амплитуду $g(x_1, y_1)$ поля зондирующего или отраженного излучения после прохождения системы регулярных фазовых неоднородностей. В соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля [5] для излучения, распространяющегося в такой системе, справедливо выражение

$$g(x_1, y_1) = C \iint_S q(x_0, y_0) \exp[iks(x_0, y_0; x_1, y_1)] dx_0 dy_0, \quad (1)$$

где C — константа; $q(x_0, y_0)$ — комплексная амплитуда поля на входе системы; $S = \pi a_0^2$ — площадь начального сечения распространяющегося пучка излучения, a_0 — начальный радиус сечения пучка; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны излучения; $s(x_0, y_0; x_1, y_1)$ — эйконал для волны, распространяющейся из точки с координатами $(x_0, y_0, 0)$ в начальном сечении пучка в точку с координатами (x_1, y_1, z) на выходе из системы.

Выражение для эйконала может быть записано в следующем виде [5]:

$$s(x_0, y_0; x_1, y_1) = z - (x_0^2 + y_0^2)/(2R_0) + (x_1^2 + y_1^2)/(2R_1) = \\ = z + [m_{11}(x_0^2 + y_0^2) + m_{22}(x_1^2 + y_1^2) - 2x_0x_1 - 2y_0y_1]/(2m_{12}). \quad (2)$$

Здесь z — полный оптический путь; R_0, R_1 — радиусы кривизны волновых фронтов в опорных плоскостях, связанных с входной и выходной опорными плоскостями системы; m_{ij} — элементы матрицы передачи отрезка неоднородной среды между указанными опорными плоскостями, $i, j = 1, 2$. Для реальной трассы протяженностью L , лежащей в свободном пространстве, эйконал будет определяться как

$$s(x_0, y_0; x_1, y_1) = \\ = z + [(x_0^2 + y_0^2) + (x_1^2 + y_1^2) - 2x_0x_1 - 2y_0y_1]/(2L). \quad (3)$$

Система регулярных фазовых неоднородностей (оптическая система) будет являться имитатором протяженной трассы, если выполняется условие $W_L = W_M$, т. е. совпадают выражения (2) и (3). Это возможно при равенстве матриц передачи оптической системы имитатора и отрезка свободного пространства длиной L , выступающих в качестве операторов $A_M = A_L$:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим вопрос о подобии процессов распространения излучения в свободном пространстве. Подставим (3) в (1) и приведем (1) к безразмерному виду. Тогда легко получить единственный критерий подобия таких процессов [6]: $\beta^2/(\lambda\alpha) = \text{idem}$, где β, α — характерные поперечный (вдоль

осей x, y) и продольный (по оси z) размеры особенностей поля. Из этого критерия следует известное условие масштабного моделирования [7], согласно которому два процесса распространения электромагнитного излучения будут подобны, если пропорционально изменить все пространственные масштабы задачи и длину волны. В данном случае, когда длина волны излучения должна сохраняться, подобными будут процессы распространения пучков, поперечные и продольные масштабы которых связаны равенством $\alpha = \beta^2$. Поэтому для выполнения соотношения $\alpha L_M = L$, где $\alpha \gg 1$,

необходимо уменьшить в $\sqrt{\alpha}$ раз значения радиусов a_0 пучка и a_{k0} его пространственной когерентности, а в α раз — радиуса F_0 кривизны волнового фронта. Существует физически реализуемая оптическая система, способная осуществить такое преобразование. Это афокальная (телескопическая) система с поперечным увеличением $\alpha^{-1/2}$ (угловым увеличением $\alpha^{1/2}$) и матрицей передачи

$$E = \begin{bmatrix} \alpha^{-1/2} & 0 \\ 0 & \alpha^{1/2} \end{bmatrix}.$$

Обратное преобразование после прохождения пучком излучения слоя модельной среды протяженностью L_M должно осуществляться оптической системой с матрицей передачи E^{-1} . С учетом унимодулярности ($\det E = 1$) матрица, обратная E , имеет вид

$$E^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & 0 \\ 0 & \alpha^{-1/2} \end{bmatrix},$$

т. е. также является матрицей передачи афокальной системы, но с поперечным увеличением $\alpha^{1/2}$ или угловым увеличением $\alpha^{-1/2}$. Таким образом, все необходимые преобразования пучка излучения в имитаторе трассы могут быть осуществлены физически реализуемыми элементами — двумя афокальными компонентами, разделенными оптическим промежутком длиной $L_M \ll L$. Матрица передачи такого имитатора может быть определена как

$$\begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & 0 \\ 0 & \alpha^{-1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha^{-1/2} & 0 \\ 0 & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha L_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Построенный таким способом имитатор трассы, включающий, например, афокальные компоненты с поперечными увеличениями 1/30 и 30, позволяет при габаритных размерах, не превышающих 2 м, воспроизводить трассы протяженностью до 1 км. Длина имитируемой трассы регулируется путем изменения длины промежутка L_M или увеличения панкратических афокальных компонентов имитатора. Подобные имитаторы успешно используются в практике оптических измерений сравнительно давно [8]. Однако опыт их эксплуатации показывает, что наличие подвижных элементов в их оптических системах может стать причиной возникновения заметных систематических погрешностей результатов оптико-локационных измерений, в частности, калибровки мер ЭПР, вследствие, во-первых, отступления от строгой взаимнообратной зависимости увеличений афокальных компонентов и, во-вторых, неточности юстировки их оптических осей. Относительная систематическая погрешность калиб-

ровки мер ЭПР, возникающая из-за первой причины, имеет вид

$$\delta_\mu = (\mu + 1)^4 [\mu + (\mu + 1) R_\infty L^{-1}]^2 (16\mu^2)^{-1} (1 + 2R_\infty L^{-1})^{-2} - 1, \quad (4)$$

где $\mu = m_1 m_2$; m_1, m_2 — поперечные увеличения соответственно первого и второго афокальных компонентов имитатора, $m_1 = \alpha^{-1/2}$, $m_2 = \alpha^{1/2}$ при $\mu = 1$; R_∞ — радиус кривизны волнового фронта излучения, отраженного от калибруемой меры, при условии ее зондирования плоской волной, связанный с ЭПР меры соотношением $\sigma = 4\pi\tau R_\infty^2$, τ — коэффициент, определяющий влияние ослабления излучения в оптической системе меры.

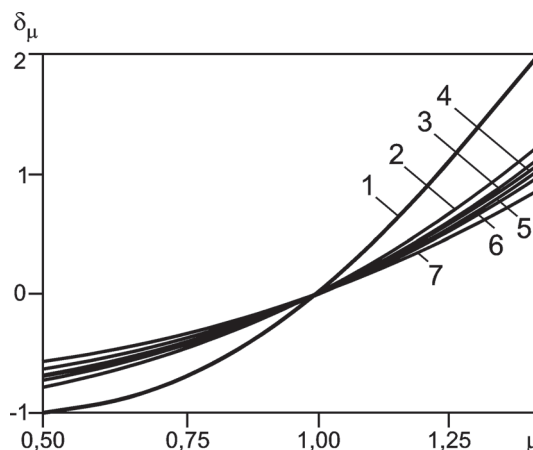
Зависимости $\delta_\mu(\mu)$, рассчитанные по (4), представлены на рисунке. При использовании имитатора в экспериментах по калибровке мер с малыми значениями ЭПР, когда $|R_\infty| \ll L$, погрешность δ_μ не зависит от L и может быть рассчитана по формуле $\delta_\mu = 0,0625(\mu + 1)^4 - 1$ (см. рисунок, кривая 4). Для мер с $R_\infty < 0$ при возрастании абсолютного значения отношения R_∞/L (кривые 1—3) наклон графиков $\delta_\mu(\mu)$ в точке $\mu = 1$ по сравнению с кривой 4 растет, а для мер с $R_\infty > 0$ уменьшается (кривые 5—7). Расчет показывает, что дополнительная погрешность калибровки превысит значение $|\delta_\mu| > 0,05$, если $|\mu - 1| > 0,02$. С увеличением $|\mu - 1|$ темп роста погрешности калибровки мер резко возрастает.

Необходимость уменьшения указанных дополнительных погрешностей калибровки мер ЭПР обуславливает целесообразность применения имитаторов трасс с высокими метрологическими характеристиками. Оптическая система такого имитатора должна содержать минимальное количество элементов и не иметь подвижных частей. Этим требованиям удовлетворяет имитатор, построенный по трехкомпонентной схеме, включающей компоненты — два длиннофокусных положительных и один короткофокусный отрицательный, расположенный между ними. Чтобы такая оптическая система выполняла функции имитатора трассы, фокусные расстояния f_1, f_2, f_3 компонентов выбирают так, что-

бы выполнялись условия $f_1 + f_3 = \alpha^{1/2} L$; $f_1 f_3 |f_2|^{-1} = \alpha L$, а расстояния между первым и вторым и между вторым и третьим компонентами устанавливают равными соответственно $f_1(1 - \alpha^{-1/2})$; $f_3(1 - \alpha^{-1/2})$. Фокусное расстояние второго компонента при фиксированном значении α выражается как $|f_2| = \alpha^{-1/2} f_1 f_3 (f_1 + f_3)^{-1}$. Максимальный габаритный размер такого имитатора $2L\alpha^{1/2}$. В частности, использование в его составе компонентов с фокусными расстояниями $f_1 = f_3 = 1$ м, $|f_2| = 0,02$ м обеспечивает моделирование трассы протяженностью $L = 50$ м. Это уже позволяет реализовать в лабораторных условиях метод калибровки рабочих мер ЭПР, предложенный в [4].

Несмотря на свою трехкомпонентную структуру, подобные имитаторы полностью соответствуют принципу построения, сформулированному выше, так как могут быть представлены в виде двух афокальных систем с взаимно обратными значениями поперечных увеличений $|f_{21}|/f_1$ и $f_3/|f_{23}|$, разделенных оптическим промежутком длиной $|f_{21}| + |f_{23}|$.

При этом $|f_{21}|^{-1} + |f_{23}|^{-1} = |f_2|^{-1}$; $f_1/|f_{21}| = f_3/|f_{23}| = \alpha^{1/2}$.



Относительная систематическая погрешность δ_μ калибровки мер ЭПР в зависимости от поперечных увеличений компонентов имитатора μ и различных значений радиуса кривизны волнового фронта излучения отраженного от меры: $R_\infty = -0,3L$; $-0,1L$; $-0,03L$ — кривые 1—3; $|R_\infty| \ll L$ — кривая 4; $R_\infty = 0,03L$; $0,1L$; $0,3L$ — кривые 5—7

Л и т е р а т у р а

1. Попело В. Д. и др. Экспериментальные исследования оптических свойств образцов радиопоглощающих материалов в условиях активного лазерного зондирования на длинах волн 0,339; 0,532; 1,064; 1,54 и 10,6 мкм // Современные проблемы и перспективные направления развития авиационных комплексов и систем военного назначения, форм и способов их боевого применения: Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Ч. 5. Воронеж: ВАИУ, 2011. С. 159—162.
2. Попело В. Д., Бурзак И. В., Никифорова А. Л. Экспериментальные исследования оптико-локационных характеристик линейных объектов, угрожающих безопасности полетов вертолетов на сверхмалых высотах // Там же. С. 162—166.
3. Попело В. Д., Фахуртдинов И. Р. Оптико-локационные характеристики объектов различной размерности // Метрология. 2012. № 7. С. 9—18; Popelo V. D., Fakhurtdinov I. R. Optical detection and ranging characteristics of objects of different dimensions // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 9. P. 1012—1017.
4. Попело В. Д., Фахуртдинов И. Р. Калибровка рабочих мер для натуральных измерений ЭПР объектов в оптическом диапазоне длин волн // Метрология. 2012. № 1. С. 22—34; Popelo V. D., Fakhurtdinov I. R. Calibration of working measures for natural measurements of the effective scattering area of objects in the optical wavelength range // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 3. P. 257—264.
5. Джеррард А., Берч Дж. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.
6. Козирацкий Ю. Л., Попело В. Д. Построение физических моделей каналов распространения лазерного излучения для экспериментальных исследований конфликтного взаимодействия оптико-электронных средств // Радиотехника. 1999. № 8. С. 80—84.
7. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М.: Сов. радио, 1972.
8. А. с. 1265468 СССР. Устройство для измерений геометрических параметров пучка лазерного излучения / В. Д. Попело и др. // Открытия. Изобретения. 1986. № 39.

Дата принятия 24.04.2013 г.