УДК 535.232.6

МЕТОД КАЛИБРОВКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ

С. Е. Стукачёв¹, И. Е. Кожеватов²

¹ Институт прикладной физики РАН,

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Предложен метод калибровки пространственного распределения светочувствительности матричных приёмников излучения. Он основан на измерении стабильных по времени распределений интенсивности светового пучка при нескольких различных комбинациях взаимного положения пучка и приёмника излучения. Разработана схема эксперимента для реализации данного метода и решена обратная задача восстановления пространственного распределения светочувствительности по результатам измерений. При помощи численного моделирования эксперимента исследованы свойства алгоритма калибровки. Проведены эксперименты по калибровке пространственных распределений светочувствительности матриц, работающих по принципам функционирования приборов с зарядовой связью.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения широкого круга исследовательских и прикладных задач современной физики требуется регистрация пространственной структуры интенсивности оптического излучения. Это, в частности, задачи измерения волновых полей, построения объёмных изображений, проведения астрономических наблюдений, а также ряд технических задач.

За прошедшие годы для регистрации пространственной структуры интенсивности оптического излучения были созданы различные типы светорегистрирующих устройств. Первоначально регистрация интенсивности осуществлялась при помощи точечных фотодиодных приёмников путём последовательного сканирования. Подобные измерения занимали большое количество времени, что в конечном итоге снижало их точность.

Появление многоэлементных (многоканальных) фотоприёмников, таких, как матричные фотодиодные приёмники и телевизионные трубки, можно назвать революцией в развитии техники измерения пространственных распределений интенсивности. Однако у всех многоканальных приёмников излучения есть принципиальный недостаток — неидентичность светорегистрирующих элементов. Это, в первую очередь, приводило к пространственной неоднородности светочувствительности приёмников и, как следствие, к систематическим ошибкам при регистрации пространственного распределения интенсивности.

На сегодняшний день наиболее распространёнными светорегистрирующими устройствами являются матрицы, работающие по принципам функционирования приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы). Последние были изобретены в 1969 году [1], а уже в 1970 году были разработаны и созданы первые основанные на них устройства, позволяющие регистрировать изображения [2]. Будучи свободными от известных недостатков фотодиодных приёмников и телевизионных трубок, ПЗС-матрицы быстро получили широкое распространение в технике научных экспериментов и в различных областях производства, а также в бытовых приборах.

Тем не менее, ПЗС-матрицы имеют тот же принципиальный недостаток, что и другие многоэлементные фотоприёмники — пространственную неоднородность светочувствительности [3].

Каждый элемент ПЗС-матрицы характеризуется своим значением светочувствительности, которая определяет зависимость величины получаемого от него электрического сигнала от интенсивности излучения, падающего на его поверхность.

Для уменьшения ошибок при регистрации пространственной структуры интенсивности оптического излучения проводят калибровку пространственного распределения светочувствительности фотоприёмника по поверхности матрицы. Подчеркнём, что здесь и далее речь идёт не об абсолютной калибровке, т. е. определении отношения числа фотоэлектронов к числу падающих на приёмный элемент фотонов, а только о значении светочувствительности элементов по отношению друг к другу. При этом за единицу может быть принята чувствительность любого из элементов матрицы.

На сегодняшний день основным способом калибровки пространственного распределения светочувствительности матричных фотоприёмников является так называемая калибровка кадра плоского поля [4]. Она состоит в том, что при помощи матричного приёмника регистрируется изображение однородного светового пучка и по неоднородностям изображения определяется пространственное распределение светочувствительности элементов матрицы. Недостатки такого метода хорошо известны: калибрующий световой пучок является равномерным лишь с некоторой, как правило небольшой, точностью и не может рассматриваться как эталонный. Поэтому актуальной является задача калибровки светочувствительности ПЗС-матрицы без использования эталонных распределений интенсивности.

В настоящей работе представлен метод калибровки пространственного распределения светочувствительности матричных приёмников, позволяющий определять относительные значения светочувствительности их отдельных элементов. Он основан на тех же принципах, которые успешно используются при абсолютной калибровке поверхностей эталонных пластин в интерферометрах [5, 6]. Основная идея метода заключается в измерении стабильных во времени распределений интенсивности светового пучка при нескольких различных комбинациях взаимного положения измеряемого двухмерного распределения интенсивности и ПЗС-матриц. Такая методика при выполнении некоторых условий позволяет получить массив данных, из которого восстанавливается как распределение светочувствительности матричного приёмника, так и распределение интенсивности светового пучка.

В работе изложены основные принципы метода калибровки пространственного распределения светочувствительности матричных фотоприёмников и порядок его реализации. Описан алгоритм восстановления пространственного распределения светочувствительности матрицы по данным измерений, а также приведено теоретическое и численное исследование свойств алгоритма и его применимости. Представлены результаты пробного эксперимента по калибровке пространственного распределения светочувствительности одного образца ПЗС-матрицы предложенным методом.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ

В данном разделе изложены основные принципы метода калибровки светочувствительности матричных фотоприёмников и представлен алгоритм восстановления двумерного распределения светочувствительности матрицы по данным измерений.

Под светочувствительностью элемента ПЗС-матрицы будем понимать коэффициент пропорциональности между измеренной интенсивностью I^{\exp} , определяемой значением выходного электрического сигнала, получаемого с элемента матрицы, и величиной интенсивности оптического

излучения I, падающего на элемент. Будем полагать, что I^{\exp} линейно зависит от I, т. е. значение светочувствительности не зависит от величины интенсивности падающего на элемент излучения и не меняется с течением времени.

Для удобства математического описания будем рассматривать ПЗС-матрицу в виде прямоугольной сетки, в каждом из $N_x \times N_y$ узлов которой находится светочувствительный элемент. При этом для простоты мы будем пренебрегать конечным размером элементов, считая их точечными. Введём в плоскости матрицы прямоугольную систему координат с осями x и y так, чтобы их направления совпадали со сторонами матрицы, а точки, в которых находятся элементы матрицы, имели целочисленные значения координат. Каждому элементу, имеющему координаты x и y, соответствует одно значение M(x, y) двумерного распределения светочувствительности. Если ПЗС-матрица освещена световым пучком, то при сделанных выше предположениях интенсивность $I^{\exp}(x, y)$ на каждом элементе матрицы задана формулой

$$I^{\exp}(x,y) = I(x,y)M(x,y),$$

где I(x, y) — интенсивность волнового поля, падающего на элемент ПЗС-матрицы, находящийся в точке с координатами x и y.

Как мы уже отмечали, основная идея предложенного метода калибровки светочувствительности ПЗС-матриц заключается в следующем: измеряя интенсивность светового пучка при различных взаимных положениях распределений интенсивности и светочувствительности, мы должны получить систему уравнений, позволяющую найти все неизвестные значения M(x, y) и I(x, y).

Уравнения для каждого элемента ПЗС-матрицы имеют вид

$$I_i^{\exp}(x,y) = I(x + \Delta x_i, y + \Delta y_i)M(x,y), \tag{1}$$

где i обозначает номер измерения, а Δx_i и Δy_i — смещения пучка относительно матрицы по координатам x и y. Здесь мы полагаем, что Δx_i и Δy_i кратны расстоянию между элементами матрицы.

Заметим, что выбор конкретной процедуры эксперимента, т. е. количества измерений и величины сдвигов, достаточных для однозначного восстановления распределения светочувствительности ПЗС-матрицы, не является однозначным. Из качественных соображений ясно, что для того, чтобы система уравнений вида (1) имела единственное решение, необходимо выполнение следующих условий: количество измерений n должно быть достаточным для того, чтобы в полученной системе число неизвестных не превышало количество уравнений; величины относительных смещений Δx_i и Δy_i должны быть подобраны таким образом, чтобы измеренные распределения $I_i^{\exp}(x, y)$ несли информацию о функциях M(x, y) и I(x, y), достаточную для их последующего восстановления. Кроме того, желательно удовлетворить этим условиям при минимальном количестве измерений.

Второе условие требует дополнительных пояснений. С помощью фурье-преобразования функцию I(x, y) можно представить в виде пространственного спектра, т.е. набора периодических фурье-компонент. Сдвиг на расстояние, кратное периоду какой-либо компоненты, не даёт информации об этой составляющей спектра. Следовательно, сдвиги должны быть подобраны таким образом, чтобы фурье-компоненты, пропущенные в результате одного сдвига, обязательно учитывались другим. В этом случае можно надеяться на то, что проведённые измерения несут достаточную информацию о неизвестных распределениях M(x, y) и I(x, y).

Исходя из приведённых выше рассуждений, наиболее очевидным является выбор сдвигов Δx_i и Δy_i равными взаимно простым числам. Хотя в общем случае это условие не является достаточным для того, чтобы результаты измерений несли достаточную информацию о распределениях

M(x, y) и I(x, y) [7], для величин Δx_i и Δy_i , представляющих собой числа с малой разрядностью, такой выбор оказывается вполне оправданным.

В конечном итоге, выбор конкретных значений Δx_i и Δy_i должен проверяться при помощи численного моделирования эксперимента по калибровке ПЗС-матрицы.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО КАЛИБРОВКЕ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ

В данном разделе приведены результаты численного моделирования эксперимента по калибровке матричных фотоприёмников, позволяющие установить свойства алгоритма калибровки и найти точный вид процедуры измерений, позволяющей однозначно восстановить распределение светочувствительности ПЗС-матрицы.

Численное моделирование эксперимента заключалось в следующем. Задавались исходные распределения светочувствительности ПЗС-матрицы $M_0(x, y)$ и интенсивности светового пучка $I_0(x, y)$, после чего для нескольких взаимных положений $M_0(x, y)$ и $I_0(x, y)$ определялись интенсивности $I_i^{\exp}(x, y)$, как если бы они были измерены в реальном эксперименте. По найденным значениям $I_i^{\exp}(x, y)$ численно решалась система вида (1). Сравнение найденных из системы (1) распределений M(x, y) и I(x, y) с заданными $M_0(x, y)$ и $I_0(x, y)$ служило проверкой применимости выбранной для моделирования процедуры измерений.

Распределение светочувствительности $M_0(x, y)$ задавалось в виде массива размером $N_x \times N_y$, где $N_x = 320$ и $N_y = 240$. Значения элементов массива определялись формулой

$$M_0(x, y) = 1 + \xi(x, y),$$

где $\xi(x, y)$ — функция, заданная при помощи генератора случайных чисел, максимальное абсолютное значение которой не превышает 0,05, что соответствует характерной амплитуде пространственной неоднородности светочувствительности реальных ПЗС-матриц.

Интенсивность светового пучка задавалась в форме гауссова распределения с характерной шириной 10 мм и имела вид

$$I_0(x,y) = A_0 \exp[-(x^2 + y^2)/D^2].$$

Поскольку координаты x и y измеряются в единицах расстояния между центрами двух элементов матрицы, которое составляет величину порядка 10 мкм, то $D = 1\,000$. Заметим, что конкретный вид распределения интенсивности не играет существенной роли при численном моделировании эксперимента по калибровке ПЗС-матриц.

Для моделирования была выбрана процедура эксперимента, состоящая из пяти измерений интенсивности при различных взаимных положениях ПЗС-матрицы и светового пучка: величина $I_1^{\exp}(x, y)$ была получена при исходном положении, когда $\Delta x_1 = 0$ и $\Delta y_1 = 0$; $I_2^{\exp}(x, y) -$ при смещении вдоль координаты x на $\Delta x_2 = \Delta N_1$ и $\Delta y_2 = 0$; $I_3^{\exp}(x, y) -$ при смещении вдоль координаты x на $\Delta x_3 = \Delta N_2$ и $\Delta y_3 = 0$; $I_4^{\exp}(x, y) -$ при смещении вдоль координаты y на $\Delta y_4 = \Delta N_1$ и $\Delta x_4 = 0$; $I_5^{\exp}(x, y) -$ при смещении вдоль координаты y на $\Delta y_5 = \Delta N_2$ и $\Delta x_5 = 0$.

Величины смещений ΔN_1 и ΔN_2 выбирались из набора взаимно простых чисел 5, 7, 11, 19, 23.

Значения $I_i^{\exp}(x,y)$ моделировались как

$$I_{i}^{\exp}(x,y) = I_{0}(x + \Delta x_{i}, y + \Delta y_{i})M_{0}(x,y) + \chi(x,y),$$
(2)

где $\chi(x, y)$ — функция, характеризующая аддитивный шум матричного приёмника и задаваемая при помощи генератора случайных чисел. Максимальные абсолютные значения $\chi(x, y)$ выбирались равными 10^{-2} и 10^{-3} и соответствовали характерному шуму восьмиразрядной ПЗС-матрицы без усреднения и при усреднении по 100 кадрам соответственно.

С. Е. Стукачёв, И. Е. Кожеватов

553

В пространственном спектре $\chi(x, y)$ присутствуют все фурье-компоненты, следовательно, численное решение системы уравнений (2) позволяет ответить на вопрос о применимости выбранной процедуры измерений. В случае, если результаты модельных измерений не несут информацию о какой-либо пространственной фурье-компоненте интенсивности оптического излучения, восстановленные распределения M(x, y) и I(x, y) будут содержать ошибку, которая может быть легко обнаружена путём их сравнения с заданными распределениями $M_0(x, y)$ и $I_0(x, y)$ соответственно.

Заметим, что мы легко удовлетворяем условию на количество уравнений. Действительно, в результате 5 измерений мы получим систему из $5N_xN_y$ уравнений, в которой неизвестными являются N_xN_y значений светочувствительности M(x,y) и $(N_x + \Delta N) (N_y + \Delta N)$ значений интенсивности I(x,y), зарегистрированных элементами ПЗС-матрицы в ходе эксперимента. Здесь ΔN — наибольшее из значений смещений ΔN_1 и ΔN_2 . Если $\Delta N < N_x$ и $\Delta N < N_y$, то при n = 5 количество уравнений превышает число неизвестных.

Система уравнений (2) решалась путём численной минимизации функционала вида

$$F[M(x,y), I(x,y)] = \sum_{i=1}^{5} \sum_{x,y} \{ I_i^{\exp}(x,y) - I(x + \Delta x_i, y + \Delta y_i) M(x,y) \}^2,$$

составленного из уравнений системы, которая выполнялась методом покоординатного спуска [8].

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования эксперимента по калибровке матричных приёмников при $\Delta N_1 = 11$, $\Delta N_2 = 19$ и $|\chi(x,y)| < 10^{-3}$. На рис. 1*a* представлено модельное двумерное распределение $I_1^{\exp}(x, y)$, на рис. 1*б* и *в* — восстановленные распределения I(x,y) и M(x,y) соответственно, на рис. 1*г*, ∂ и *е* — соответствующие одномерные распределения при фиксированной координате *y*.

Как уже отмечалось выше, в качестве проверки применимости выбранной процедуры измерений проводилось сравнение найденных из системы (2) распределений M(x,y) и I(x,y) с зада-



Рис. 1. Результаты численного моделирования по калибровке матричных приёмников: (a) — модельное двухмерное распределение $I_1^{\exp}(x, y)$; (b) — восстановленное распределение I(x, y); (e) восстановленное распределение M(x, y); (e), (d) и (e) — соответствующие одномерные распределения при y = 120

нными $M_0(x, y)$ и $I_0(x, y)$. Как показали результаты численного моделирования, при правильном выборе величин сдвигов Δx_i и Δy_i относительная погрешность определения светочувствительности

$$\delta M(x,y) = [M(x,y) - M_0(x,y)]/M(x,y)$$

не превышает максимального значения шума матричного приёмника $\chi(x, y)$. На рис. 2 представлена полученная в результате численного моделирования зависимость относительной погрешности $\delta M(x)$ от координаты x при фиксированной координате y в случае максимального значения $\chi(x, y)$, равного 10^{-3} .

Заметим, что в идеализированной ситуации, т.е. при $\chi(x,y) = 0$, разность между M(x,y) и $M_0(x,y)$ определяется только погрешностью численного решения системы уравнений и может



Рис. 2. Зависимость относительной погрешности определения светочувствительности $\delta M(x)$ от координаты x при некоторой фиксированной координате y

быть сведена к нулю с любой наперёд заданной точностью.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО КАЛИБРОВКЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЁМНИКА

На основании результатов численного моделирования эксперимента была проведена реальная калибровка пространственного распределения светочувствительности матричного фотоприёмника. Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Здесь S источник стабильного во времени оптического излучения, L — объектив, переносящий изображение источника в плоскость ПЗС-матрицы М. Матричный приёмник излучения был установлен на системе трансляторов, позволяющей осуществлять его перемещения, параллельные сторонам ПЗС-матрицы, D — экран с отверстием,



Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки для калибровки пространственного распределения светочувствительности ПЗС-матриц: S — источник стабильного во времени оптического излучения, L — объектив, М — ПЗС-матрица, D — экран с отверстием

по изображению которого осуществлялся контроль величины смещений приёмника.

Процедура измерений включала в себя контроль перемещений матричного фотоприёмника и непосредственно регистрацию интенсивности $I_i^{\exp}(x, y)$ при различных взаимных положениях ПЗС-матрицы и изображения источника. Перед каждым сдвигом приёмника в оптическую схему вставлялся экран с отверстием D, регистрировалось изображение отверстия до и после перемещения приёмника, и по смещению центра тяжести изображения отверстия вычислялись значения сдвигов матрицы Δx_i и Δy_i . После этого экран выдвигался, и происходила регистрация интенсивности $I_i^{\exp}(x, y)$ при новом положении ПЗС-матрицы. Всего в каждом эксперименте регистрировалось пять распределений $I_i^{\exp}(x, y)$.



Рис. 4. Результаты эксперимента по калибровке ПЗС-матрицы: (a) — измеренное распределение $I_1^{\exp}(x, y)$; (b) — восстановленное распределение I(x, y); (e) — восстановленное распределение M(x, y); (e), (d) и (e) — соответствующие одномерные распределения при y = 50

Для эксперимента по калибровке была выбрана ПЗС-камера «Видеоскан-2001-415» с матрицей «Sony ICX415AL» с 782×582 элементами. Для уменьшения шума на ПЗС-матрице при измерении каждого распределения $I_i^{\exp}(x, y)$ проводилось усреднение по 500 кадрам.



Рис. 5. Восстановленные распределения светочувствительности ПЗС-матрицы M(x) при фиксированной координате y для трёх различных экспериментов, отличающихся величинами смещений Δx_i и Δy_i (сплошная, штриховая и пунктирные линии)

На рис. 4 представлены результаты эксперимента по калибровке ПЗС-матрицы. На рис. 4*a* показан фрагмент измеренного двумерного распределения $I_i^{\exp}(x, y)$, на рис. 4*б* и *e* — фрагменты восстановленных распределений I(x, y) и M(x, y) соответственно, на рис. 4*e*, *d* и *e* — соответствующие одномерные распределения при фиксированной координате *y*.

На рис. 5 представлены фрагменты восстановленных распределений светочувствительности ПЗС-матрицы для трёх различных экспериментов, отличающихся величинами смещений Δx_i и Δy_i . Видно, что восстановленные распределения отличаются друг от друга не более, чем на 10^{-3} . Отличие между распределениями обусловлено шумом ПЗС-матрицы.

Таким образом, эксперимент продемонстрировал, что предлагаемый в данной работе метод позволяет прокалибровать пространственное

распределение светочувствительности матричного фотоприёмника с точностью не хуже точности, определяемой шумами элементов матрицы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе установлены основные положения нового метода калибровки пространственного распределения светочувствительности матричных фотоприёмников. Разработана схема эксперимента, реализующего этот метод, и решена обратная задача восстановления пространственного распределения светочувствительности фотоприёмника по результатам измерений. Проведено численное моделирование эксперимента по калибровке пространственного распределения светочувствительности матричных фотоприёмников, позволившее исследовать свойства алгоритма калибровки и получить точный вид процедуры измерений, позволяющей однозначно восстановить распределение светочувствительности фотоприёмника. Проведены эксперименты по калибровке пространственных распределений светочувствительности ПЗС-матриц. Результаты экспериментов подтвердили эффективность предложенного метода калибровки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Boyle W. S., Smith G. E. // Bell Sys. Tech. J. 1970. V. 49, No. 4. P. 587.
- 2. Amelio G. F., Tompsett M. F., Smith G. E.// Bell Sys. Tech. J. 1970. V. 49, No. 4. P. 593.
- 3. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
- 4. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприёмными матрицами. Новосибирск: Наука, 2005. 255 с.
- Руденчик Е. А, Кожеватов И. Е., Черагин Н. П. и др. // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90, № 1. С. 127.
- Кожеватов И. Е., Руденчик Е. А., Черагин Н. П., Куликова Е. Х. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 94. С. 623.
- 7. Миберн Дж. Обнаружение и спектрометрия слабых источников света. М.: Мир, 1979. 304 с.
- 8. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1988. 552 с.

Поступила в редакцию 24 июня 2011 г.; принята в печать 27 июля 2011 г.

CALIBRATION METHOD FOR SPATIAL DISTRIBUTION OF LIGHT SENSITIVITY OF MATRIX PHOTO RECEIVERS

S. E. Stukachev and I. E. Kozhevatov

We propose a calibration method for spatial distribution of light sensitivity of matrix radiation receivers. It is based on measurements of time-stable distributions of the light beam intensity at several different combinations of mutual positions of the beam and the radiation receiver. The scheme of the experiment was developed to realize this method, and the inverse problem of reconstruction of the spatial distribution of photo sensitivity from the measurement results was solved. Numerical simulation of the experiment was used to study the features of the calibration algorithm. The spatial distributions of light sensitivity of the matrices, which work on the principles of charge-coupled device operation, were calibrated in an experiment.