

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.786.24:531.717.8

МЕТОДЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

© 2008 г. И. Ю. Дмитриев, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская область

Рассмотрены высокопроизводительные методы энергетической калибровки многоканальных сканирующих оптико-электронных приборов (ОЭП), в т. ч. метод измерения вероятностных характеристик пороговой чувствительности с учетом пеленгационной характеристики прибора. По результатам экспериментальных исследований приведен сравнительный анализ описанных методов.

Коды OCIS: 120.4800.

Поступила в редакцию 15.05.2008.

При разработке современных ОЭП наблюдается устойчивая тенденция существенного увеличения числа каналов информации (до 3000 и более) путем использования многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ). Это приводит к значительным затратам времени на их аттестацию по существующим методикам, которые основаны на поканальном измерении параметров ОЭП [1]. Увеличение трудоемкости аттестации многоканальных ОЭП – не единственная проблема общепринятых методик. Традиционно используемый метод поканального измерения пороговой чувствительности ОЭП осуществляется при центральном расположении изображения точечного источника излучения относительно чувствительного элемента ФПУ. Таким образом, измеряется максимальное значение пороговой чувствительности соответствующего канала ОЭП. Реально значение пороговой чувствительности носит вероятностный характер [2], так как изображение реально наблюдаемого объекта располагается случайным образом относительно чувствительных элементов и зависит в том числе от пеленгационных характеристик каждой пары чувствительных элементов ФПУ.

В статье рассматриваются три метода измерения основного параметра многоканальных ОЭП, обеспечивающих существенное повышение эффективности процесса аттестации по сравнению с общепринятым поканальным методом измерения, включая

метод выборочной оценки основного параметра многоканальных ОЭП,

метод щелевого источника излучения, вероятностный метод оценки параметров многоканальных ОЭП.

Следует отметить, что первые два метода аттестации не меняют принципиального подхода к оценке основного параметра ОЭП. Сокращается лишь трудоемкость процесса аттестации, но сохраняется принцип, характерный для поканальной оценки пороговой чувствительности при центральном расположении изображения точечного источника на чувствительной площадке многоэлементного ФПУ. Такой метод аттестации затрудняет последующее использование найденного параметра пороговой чувствительности для расчета обнаружительной способности оптико-электронной системы наблюдения, так как он не учитывает пеленгационные характеристики прибора. Поэтому оба разработанных метода целесообразно использовать на ранних этапах изготовления многоканальных ОЭП.

Третий метод обеспечивает измерение вероятностных характеристик пороговой чувствительности многоканальных ОЭП при равновероятном размещении изображения точечного источника излучения относительно чувствительных элементов ФПУ. Он позволяет существенно сократить время аттестации и обеспечить дальнейшее использование полученных результатов аттестации для расчета обнаружительных характеристик оптико-электронной системы наблюдения при различных фоновых нагрузках и алгоритмах обнаружения. В простейшем случае такими параметрами могут быть плотность вероят-

ности, математическое ожидание и дисперсия пороговой чувствительности.

Метод выборочной оценки основного параметра ОЭП

Один из способов сокращения времени измерения параметров многоканального ОЭП заключается в выборочном измерении пороговой чувствительности отдельных каналов прибора и соответствующем распространении этих измерений на оценку многоканального ОЭП в целом. Предпосылкой возможного использования указанного метода является то, что современные многоэлементные ФПУ, как правило, монтируются из отдельных модулей, каждый из которых состоит из большого числа (сотен) чувствительных элементов, созданных либо на едином кристалле, либо на едином чувствительном слое, и их характеристики в пределах единого модуля имеют ограниченный разброс.

Для экспериментальной проверки указанного метода использовался макет ОЭП, состоящий из высокоразрешающего зеркально-линзового объектива с диаметром входного зрачка 500 мм, в фокальной плоскости которого установлен ФПУ в виде линейки из 197 чувствительных элементов. Сканирование поля зрения осуществлялось с помощью зеркальной системы путем смещения изображения поля зрения относительно неподвижной линейки чувствительных элементов. Макет устанавливался в параллельном пучке коллиматорной установки, в фокальной плоскости объектива которой размещался точечный источник абсолютно черного тела (АЧТ). Последовательно для каждого чувствительного элемента проводилось измерение сигналов от точечной диафрагмы и вычислялись пороговые значения облученности $E_{пор}$. В результате был сформирован массив данных из 197 значений $E_{пор}$. Далее сравнивались величины математического ожидания (МО) и дисперсии (СКО) пороговой чувствительности исходного массива и сформированных через 1, 2...10 элементов выборки (табл. 1).

Как видно из табл. 1 разброс значений математического ожидания и дисперсии пороговой чувствительности для всех десяти распределений относительно невелик, что позволяет использовать

метод выборочной оценки на этапе предварительной оценки параметров ОЭП.

Метод щелевого источника излучения

Главным недостатком метода выборочной оценки основного параметра многоканального ОЭП при его еще достаточно высокой трудоемкости является то, что этот метод не позволяет выявить неработающие каналы. Метод щелевого источника свободен от этих недостатков.

Для реализации этого метода в фокальной плоскости коллиматорной установки вместо излучающей диафрагмы (точечный излучатель) устанавливается щелевая излучающая диафрагма (светящаяся линия), поперечный размер которой отвечает условиям точечного излучателя, а ее длина обеспечивает засветку одновременно большого числа чувствительных элементов, например, засветку блока чувствительных элементов. Такой источник излучения позволяет за один период сканирования измерить сигнал, и тем самым определить пороговую чувствительность большого числа чувствительных элементов, что в десятки раз сокращает время проведения измерений. Фактически такой метод позволяет снять сигнал с каждого чувствительного элемента ФПУ и одновременно определить общее количество и номера дефектных чувствительных элементов.

При использовании метода щелевого источника излучения должны быть соблюдены определенные условия при проведении измерений. Во-первых, временные параметры сигнала при сканировании изображения щели по чувствительному элементу должны быть аналогичны параметрам, возникающим при сканировании точечным источником. Исследования показали, что вышеприведенные требования по временным параметрам выполняются, если размер щели в направлении сканирования равен диаметру точечного источника.

Вторым условием применения щелевого источника излучения является равенство лучистых потоков, достигающих чувствительного элемента от точечного источника и от щели. При равенстве энергетических яркостей рассматриваемых источников лучистый поток от щели в $\delta a/(\pi\delta^2/4)$ раз больше, чем

Таблица 1

Выборка от общего числа каналов ОЭП, %	100	50	33,30	25	20	17	14	12,50	11	10
МО $E_{пор}$, отн. ед.	6,93	6,94	6,86	6,88	7,26	6,86	6,7	6,95	6,92	7,5
СКО $E_{пор}$, отн. ед.	0,923	0,92	0,84	0,73	1,1	0,84	0,74	0,78	0,85	1,28

от точечной диафрагмы, где δ – диаметр точечного излучателя (равен поперечному размеру щели); a – размер чувствительного элемента в направлении, перпендикулярном направлению сканирования. Для уравнивания лучистых потоков в ходе лучей от щелевого источника устанавливается нейтральный светофильтр с пропусканием $\tau = (\pi/4)(\delta/a)$. При работе в линейном динамическом диапазоне ОЭП допускается вместо светофильтра использование соответствующих поправочных коэффициентов.

В табл. 2 приведены расчетные значения МО и СКО распределения пороговой чувствительности полученных различными методами.

Как видно из табл. 2, несмотря на равенство потоков излучения значение пороговой чувствительности для щели несколько меньше, чем для точки, т. е. пороговая чувствительность несколько выше. Это объясняется тем, что коэффициент концентрации энергии объективом для точечного источника несколько меньше, чем коэффициент концентрации энергии для щелевого источника. Для щелевого источника излучения облученность в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, остается постоянной в пределах всего чувствительного элемента. Поэтому потеря лучистого потока наблюдается только по направлению сканирования. При этом коэффициент концентрации для щелевого источника излучения будет несколько больше, чем для точечного источника излучения и примерно составит величину, равную $\sqrt{\eta}$, где η – коэффициент концентрации энергии для точечного источника излучения. Различие коэффициентов концентрации энергии не остается постоянным для всех элементов ФПУ в силу различия аберраций объектива для разных площадок, разброса геометрических размеров чувствительных площадок, неравномерности чувствительности в пределах площадки и многих других факторов. В этом заключается основной недостаток метода щелевого источника излучения. Однако дисперсия этих поправочных коэффициентов не столь велика, и поэтому можно использовать среднее значение коэффициента концентрации. При расчете математического ожидания пороговой чувствительности ОЭП в целом ошибка

от использования среднего значения коэффициента оказывается мало заметной.

Метод определения вероятностных характеристик пороговой чувствительности ОЭП

Сигнал от точечного источника излучения зависит от положения энергетического центра изображения точечного источника относительно центра чувствительной площадки в направлении, перпендикулярном направлению сканирования ОЭП. При совпадении энергетического центра изображения и центра чувствительной площадки сигнал максимальный. При смещении изображения относительно центра чувствительной площадки сигнал уменьшается и достигает своего минимума при расположении центра изображения точечного источника в зазоре между двумя соседними площадками, причем оптический сигнал примерно равномерно распределяется между двумя соседними чувствительными площадками и частично теряется в зазоре и за счет краевых эффектов чувствительных площадок. Поэтому на практике сигнал с каждой из двух площадок составляет не 50% от своего максимального значения, а 20–30%, и в значительной степени определяется соотношением между размерами чувствительной площадки и пятна рассеяния изображения точечного источника, определяемого оптическим качеством объектива. Зависимость сигнала от точечного источника излучения и от смещения энергетического центра изображения точечного источника в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, называется пеленгационной характеристикой.

Очевидно, что значение максимальной пороговой чувствительности, которое имеет место при совпадении энергетического центра изображения точечного источника и центра чувствительного элемента, представляет собой частный случай, который не позволяет в полной мере судить о характеристиках обнаружения ОЭП, и скорее свидетельствует лишь о качестве сборки, юстировки и настройки ОЭП.

Для расчета обнаружительных характеристик ОЭП необходимы знания зависимости пороговой чувствительности от пеленгационной характеристики, а также вероятностные характеристики расположения изображения точечного источника относительно чувствительных элементов, что позволяет определить плотность вероятности пороговой чувствительности. Таким образом, пороговая чувствительность ОЭП является величиной случайной и изменяется в некоторых пределах от E_{\min} до E_{\max} с определенной степенью вероятности.

Таблица 2

Параметры распределения пороговой чувствительности	Значения, полученные с точечным излучателем	Значения, полученные со щелевым источником	Значения, полученные с матричным тест-объектом
МО, отн. ед.	6,93	6,18	6,41
СКО, отн. ед.	0,923	0,801	0,885

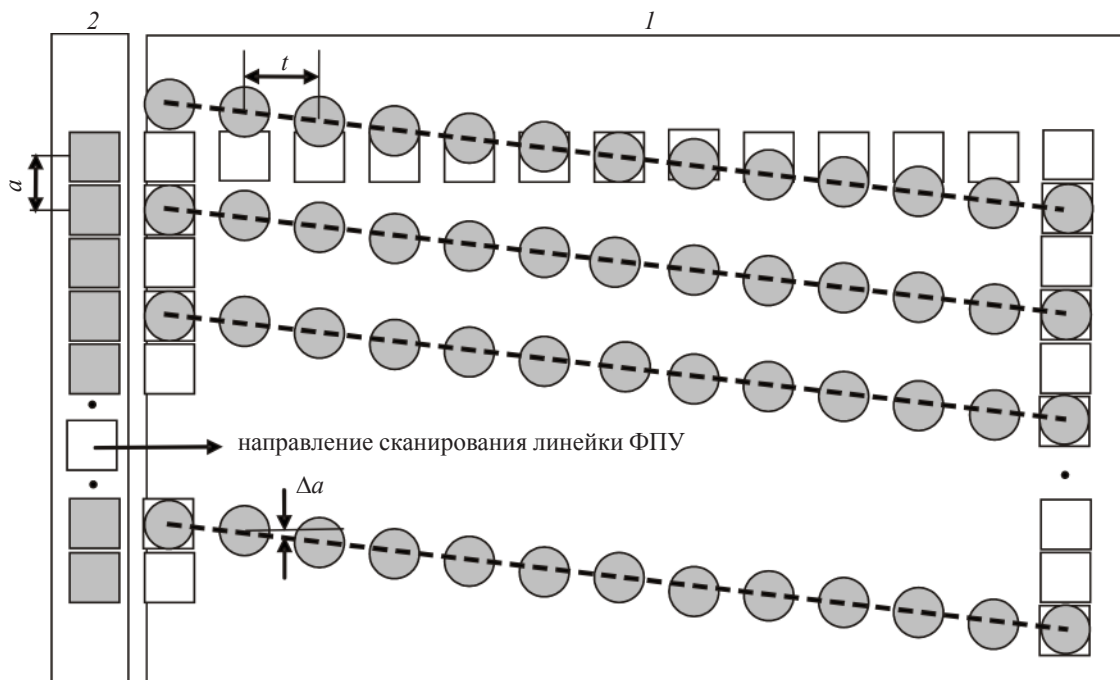
Обычно для расчета обнаружительных характеристик ОЭП принимается априорная информация о равновероятном расположении изображения точечного источника излучения относительно чувствительных элементов. (На практике этот закон соблюдается не всегда, например, в системах ОЭП, работающих в режимах самонаведения, центральное расположение изображения источника более вероятно, чем крайнее ее расположение, что соответственно может учитываться.)

Для практической реализации способа определения вероятностных характеристик пороговой чувствительности ОЭП необходимо обеспечить измерение зависимости электрических сигналов со всех чувствительных элементов ФПУ от смещения энергетических центров изображений точечных источников излучения относительно центров соответствующих пикселей ФПУ, т. е. измерение пеленгационной характеристики каждого чувствительного элемента. Учитывая, что число каналов информации современных сканирующих ОЭП достигает нескольких тысяч и в перспективе имеет устойчивую тенденцию дальнейшего роста, реализация этих измерений с помощью традиционных методов поканальной аттестации практически невозможна.

В работе [3] предложен принципиально новый метод определения энергетической пороговой чув-

ствительности каждого канала в отдельности и многоканального сканирующего ОЭП в целом. В этом методе поканальная информация с каждого чувствительного элемента содержится в общей информации лишь как частный случай. Измерения осуществляются с помощью длиннофокусного высокоточного коллиматора, в фокальной плоскости которого размещается тест-объект в виде источников излучения, формирующих в поле обзора ОЭП совокупность точечных источников в виде матрицы с регулярной структурой столбцов и строк (см. рисунок). В матрице точечных источников излучения направление столбцов совпадает с направлением линейки чувствительных элементов ФПУ. Размещение точечных источников в столбце и строке обеспечивает при сканировании в направлении, перпендикулярном направлению столбцов, регистрацию фотоприемным устройством распределения сигналов, пропорциональных энергетической пороговой чувствительности для всех положений энергетических центров изображений точечных источников излучения относительно центров соответствующих чувствительных элементов ФПУ, т. е. характер распределения пороговой чувствительности с учетом пеленгационной характеристики ОЭП.

На рисунке приведен вид изображения тест-объекта в плоскости ФПУ для ОЭП, у которого раз-



Изображение тест-объекта в плоскости ФЧЭ при измерении параметров пороговой чувствительности ОЭП. 1 – линейка ФЧЭ, 2 – изображение тест-объекта в плоскости ФЧЭ. a – шаг фото-чувствительных элементов, Δa – смещение источников в строке в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, t – шаг излучателей в строке матрицы точечных источников в направлении сканирования.

мер фоточувствительного элемента согласован с размером пятна рассеяния оптической системы. Излучатели в столбцах матрицы в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, размещены с интервалом $2a$, где a – шаг фоточувствительных элементов в линейке ФПУ. Шаг t источников в строке в направлении сканирования должен быть $t \geq V\tau$, где V – скорость сканирования, τ – время переходных процессов ФПУ. При этом источники в строке смещены друг относительно друга в направлении, перпендикулярном направлению сканирования на $\Delta a = 2at/D$, где D – размер линейного поля обзора ОЭП. Значение этого смещения определяет число опросов каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ), которое задается с учетом требований к точности определения пороговой чувствительности и соотношения размеров ФЧЭ и зазоров между ними. Расчеты показывают, что измерение пороговой чувствительности с погрешностью не более 3–5% обеспечивается уже при наличии 10 отсчетов на ФЧЭ, при соотношении “размер ФЧЭ”/“размер зазора”, равном приблизительно 0,2.

При проведении измерений ОЭП юстируют относительно тестового объекта таким образом, чтобы направление столбцов матрицы источников излучения было совмещено с направлением линейки ФЧЭ, а площадки линейки ФЧЭ, например нечетные, выставляются центрично относительно первого столбца матрицы. При сканировании снимают на выходе соответственно четных ФЧЭ сигналы, вырабатываемые при пересечении ими точечных источников в строке, которые смещены друг относительно друга в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, на дискретную величину Δa в пределах $\pm a$ относительно центра площадки. Шаг источников в столбцах выбирается в два раза больше шага ФЧЭ, что исключает взаимное влияние источников на контролируемые ФЧЭ, так как исключена возможность попадания излучения от точечного источника одновременно на два соседних элемента. Минимальное расстояние между точечными источниками в строках $t \geq V\tau$ обеспечивает независимость сигнальных откликов, формируемых на выходе ФЧЭ при сканировании.

Сигналы с четных площадок ФЧЭ характеризуют их энергетическую пороговую чувствительность для всего диапазона взаимных положений точечного источника относительно центра площадки, т. е. характер распределения пороговой чувствительности с учетом пеленгационной характеристики ОЭП. Измерения повторяют для нечетных площадок, при этом четные площадки предварительно юстируют

центрично относительно точечных источников первого столбца матрицы. По полученным значениям могут быть рассчитаны вероятностные характеристики пороговой чувствительности ОЭП, такие как среднее значение сигнала за N сканов для каждого ФЧЭ и для каждого положения точечного источника относительно центра ФЧЭ, максимальное значение энергетической пороговой чувствительности для каждого фоточувствительного элемента, энергетическую пороговую чувствительность для каждого чувствительного элемента для всех заданных тестовым объектом положений точечного источника излучения относительно центра чувствительного элемента, математическое ожидание энергетической пороговой чувствительности для каждого чувствительного элемента при условии равновероятного расположения точечного источника излучения относительно центра чувствительного элемента, математическое ожидание энергетической пороговой чувствительности всей совокупности чувствительных элементов для условия равновероятного расположения точечного источника излучения в любой точке поля зрения ОЭП, дисперсию энергетической пороговой чувствительности для всей совокупности чувствительных элементов для условия равновероятного расположения точечного источника излучения в любой точке поля зрения ОЭП и др.

Результаты экспериментальной проверки математического ожидания пороговой освещенности макета многоканального ОЭП с учетом пеленгационных характеристик и разброса чувствительности ФЧЭ, полученные по точечному и матричному источникам, показали хорошее совпадение (табл. 2). При этом производительность измерений методом матричных источников выше в десятки раз, а получаемая информация о приборе более насыщена.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик. М.: Издательство стандартов, 1988. 64 с.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.
3. Гридин А.С., Дмитриев И.Ю., Васильев В.Н. Способ определения энергетической пороговой чувствительности многоканального сканирующего тепlopеленгатора и тестовый объект для его осуществления // Патент России № 2269796. 2004.