Применение эргодической гипотезы для измерения параметров и обработки результатов измерений в инфракрасной (ИК) области спектра

Григорий Зеленов (Московская обл.)

В статье показано, что для обработки сигналов с матриц, а также измерения их параметров можно использовать эргодическую гипотезу. Описывается проект экспериментальной установки для измерения параметров матриц в ИК-диапазоне.

Введение

Одиночные и матричные приёмники электромагнитных излучений являются одной из составляющих систем технического зрения, которые могут быть разработаны для различных диапазонов – сверхвысокочастотного (СВЧ), крайне высокочастотного (КВЧ), инфракрасного (ИК) и видимого света. Такие приёмники могут иметь необходимые чувствительность, минимально-разрешимый сигнал и другие параметры, позволяющие выполнять возложенные на них задачи.

Матричные приёмники для роботов, в том числе обладающих искусственным интеллектом, как правило, являются аналогом сетчатки глаза человека. Известно, что сигнал с сетчатки глаза человека поступает в мозг и там обрабатывается для получения изображения. В настоящей статье описывается применение эргодической гипотезы для измерения параметров матриц, которые могут быть использованы в системе технического зрения робота.

Прежде чем использовать матрицу в качестве чувствительного элемента системы технического зрения, необходимо определить, является ли матрица пригодной для этого. С этой целью производятся измерения параметров матрицы. Поскольку автор не имеет доступа к измерительным приборам, для получения данных, подтверждающих возможность применения эргодической гипотезы при измерениях параметров матриц, в настоящей статье используется моделирование матриц и условий измерения. Для этого на основе имеющихся данных о материалах и с учётом физических явлений была разработана модель болометрической матрицы.

Измерение параметров матриц с использованием эргодической гипотезы является не единственным применением этой гипотезы, поэтому в статье введены основные определения, которые поясняют применение эргодической гипотезы при измерениях параметров матриц и обнаружении и идентификации различных сигналов и объектов. Идея применения эргодической гипотезы для измерения параметров матриц и обработки видеосигналов с целью обнаружения и построения изображений была предложена автором в 2004 г. и оформлена в виде заявки на изобретение [1].

Начавшийся XXI в. по всем прогнозам должен стать веком робототехники. Уже сейчас многие ведущие компании, в первую очередь японские, демонстрируют образцы роботов, которые учатся ходить. как человек, видеть. как человек, думать. как человек. При конструировании, производстве и исследованиях одиночных и матричных приёмников, которые являются составляющими зрения роботов, возникает необходимость проводить моделирование как самих одиночных и матричных приёмников, так и процессов измерения их параметров.

Для матриц и одиночных приёмников таких параметров может быть несколько, в зависимости от того, что нужно потребителю. Основными параметрами для одиночных и матричных приёмников являются:

- однородность структуры входящих в них элементов (для одиночного приёмника это однородность элементарных площадок, для матриц – однородность элементарных чувствительных элементов матрицы (ЧЭ) или пикселей);
- чувствительность;
- минимальный разрешимый сигнал (МРС) или сигнал, эквивалентный шуму (СЭШ).

Применение эргодической гипотезы для обработки результатов эксперимента

Прежде чем перейти к описанию применения эргодической гипотезы для обработки результатов эксперимента, необходимо определить используемые понятия.

Эргодическая гипотеза вводится в статистической физике для систем, обладающих большим числом одинаковых подсистем, которые находится в стационарном состоянии, и в теории случайных процессов [7, 9, 10]. Её содержание заключается в том, что для больших систем, которые можно разбить на большое число малых подсистем, «средние по времени равны средним статистическим».

В пределе, чтобы определить стационарное состояние большой системы, можно провести измерение двумя путями:

- следить за состоянием одной подсистемы во времени (проводить выборки или измерения в разные моменты времени), затем суммированием и усреднением этих выборок и суммированием по всем подсистемам определить состояние всей системы;
- определить состояние каждой подсистемы (сделать по одной выбор-

ке в один или разные моменты времени), затем просуммировать эти состояния по всем подсистемам, чтобы получить состояние всей системы.

Эргодическая гипотеза утверждает, что для большой системы, находящейся в стационарном равновесии или близком к нему, не важно, первым или вторым путём вычисляется статистический параметр большой системы.

Проводя измерения параметров ИК-матриц, автор предложил в целях ускорения вычислений при измерениях параметров матриц и обработке видеосигналов применить эргодическую гипотезу. Ускоренная обработка актуальна при работе с видеосигналами с матриц в реальном времени. Возможность применения этой гипотезы к измерению одиночных и матричных приёмников следовала из того, что матрицу, состоящую, например, из 320 × 240 пикселей, можно рассматривать как большую систему, состоящую из одинаковых подсистем пикселей меньшей размерности. Состояние каждого пикселя в этом случае определяется его откликом в некоторый момент времени.

Вследствие предполагаемой однородности пикселей и методов измерения их откликов, последние считаются одинаковыми в разные моменты времени, если соответствующие пиксели находятся в одинаковых условиях по отношению к падающему на них излучению.

Чтобы формализовать применение эргодической гипотезы к измерению параметров матриц, введём понятие матрицы как совокупности чувствительных элементов, определённым образом размещённых и закреплённых на некоторой поверхности и обладающих откликом (в виде электрического напряжения или тока) на падающее электромагнитное излучение. Эта совокупность имеет систему считывания, которая производит цифровые или аналоговые выборки с каждого пикселя и организует их передачу по каналам связи на устройства для визуализации откликов или последующей их обработки.

Как правило, чувствительные элементы матрицы располагаются на плоской поверхности в узлах через a*b, где a – расстояние между узлами по горизонтали, b – расстояние между узлами по вертикали на сетке размерностью IMax*JMax, где IMax – число пикселей в одной строке, а JMax – число строк в матрице.

Под состоянием матрицы будем понимать значения откликов с каждого пикселя матрицы на сигнал $W(x, y, z)$ в виде, полученном к моменту времени t выполненного измерения, оцифрованных и сохранённых в памяти для дальнейшей обработки с помощью устройства выборки и хранения, плюс вектор параметров. Таким образом, состояние матрицы является объединением множества откликов пикселей матрицы $\{A_{IJ}\}$ и вектора параметров $\{t, f, P_1, P_2, ..., P_k\}$. Здесь $\{A_{IJ}\}$ – отклики с матрицы на излучение объекта, находящегося в плоскости предметов оптической системы матрицы, t – момент времени, к которому было произведено измерение и оцифровка всех измеренных значений откликов с пикселей, f – частота, с которой производились измерения откликов пикселей при переходе от одного пикселя к другому, $P_1, P_2, ..., P_k$ – параметры, характеризующие условия, в которых находилась матрица при измерении.

Например, $P_1 = T_{подл}, P_2 = T_{ачт}, P_3 = U1$ и т.д., где $T_{подл}$ = 20°C – температура подложки матрицы, $T_{ачт}$ = 30°C – температура АЧТ, зафиксированная датчиком температуры, $U1$ = 15 В – напряжение, которое подаётся на матрицу и т.д. В векторе параметров должны быть указаны все измеримые параметры, влияющие на отклики пикселей $\{A_{IJ}\}$ матрицы. Например, если состояние матрицы было измерено в составе оптической системы, то в качестве элементов вектора параметров необходимо указать фокусное расстояние оптической системы, расстояние до предмета и др.

Два состояния матрицы будем считать равными в различные моменты времени t_1 и t_2, если одновременно совпадают как локальные, так и глобальные статистические средние значения откликов пикселей матрицы $\{A_{IJ}\}$ при одинаковом векторе параметров $\{t, f, P_1, P_2, ..., P_k\}$. Под локальными средними статистическими значениями откликов понимаются средние статистические значения, вычисленные по подмножествам, на которые топологически связным образом можно разбить всё множество $\{A_{IJ}\}$, а под глобальными средними значениями понимаются средние, измеренные и вычисленные значения по всему множеству $\{A_{IJ}\}$.

Под частичным состоянием матрицы понимается любая выборка, организованная из множества откликов $\{A_{IJ}\}$ с вектором параметров $\{t, f, P_1, P_2, ... P_k\}$.

На множестве состояний и/или частичных состояний матрицы можно определить различные функции одной или несколько переменных. В качестве аргументов функции выступают состояния матрицы, причём все эти функции являются параметрическими. Значением функции может быть число или матрица. От значения функции, в свою очередь, можно организовать новую функцию. В этом случае получаются сложные функции от состояний матриц.

Функция получения среднего значения состояния матрицы. Пусть на матрицу падает плоская волна мощностью W и измерены отклики всех пикселей матрицы, например, с частотой f = 5 МГц. Тогда при векторе параметров $\{t, f, P_1, P_2, ... P_k\}$, среднее значение, вычисленное по всем элементам матрицы откликов $\{A_{IJ}\}$, является значением функции получения среднего значения состояний матрицы, и его можно обозначить как $<A>$.

Функция получения чувствительности пикселей. Если взять два состояния матрицы, первое из которых получено при воздействии на матрицу плоской волны с мощностью W^1, а второе – при воздействии на матрицу плоской волны мощностью W^2, и образовать новую матрицу, элементы которой получены по правилу $\{CH_{IJ}\}$ = $= (\{U^2_{IJ}\} - \{U^1_{IJ}\})/(\{W^2_{IJ}\} - \{W^1_{IJ}\})$, где U^2_{IJ} – величины откликов второго состояния, U^1_{IJ} – величины откликов первого состояния, W^2_{IJ}, W^1_{IJ} – значения мощностей, достигающих пикселей в этих состояниях, то полученная матрица $\{CH_{IJ}\}$ называется матрицей чувствительностей пикселей при разности внешних воздействий $W^2 - W^1$, т.е. вектор параметров для функции можно записать как $\{t, f, W^2 - W^1, P_2, ..., P_k\}$. Среднее значение по всем элементам матрицы $\{CH_{IJ}\}$ называется средней чувствительностью пикселей матрицы и обозначается $<CH>$.

Функция получения шума состояния матрицы заключается в вычислении квадратного корня из дисперсии, определённой по всем откликам пикселей состояния матрицы при условии, что на матрицу не падает никакого внешнего излучения, т.е. $W = 0$.

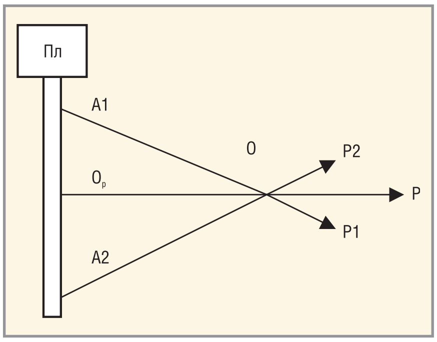

Рис. 1. Бесконечная излучающую плоскость Пл, на которой источники ИК-излучения равномерно распределены и имеют одинаковую интенсивность

Другими словами, это – квадратный корень из математического ожидания [8] для всех величин $(U_{IJ} - \langle U \rangle)^2$ состояния матрицы. Если использовать для обозначения шума *SN*, то:

$$SN = \sqrt{M\left(U_{ij} - U\right)^2}.$$

Функция получения сигнала, эквивалентного шуму, получается вычислением *ISN* = *SN*\<*CH*>, где <*CH*> – среднее значение чувствительности по состоянию матрицы, *SN* – шум состояния матрицы, а *ISN* – обозначение для сигнала, эквивалентного шуму.

Функция получения минимально разрешимого сигнала получается умножением шума состояния матрицы на коэффициент, который больше 2. Если обозначить его как *MRS*, тогда *MRS* = *CONST***SH*, где константа *CONST* ≥ 2 определяет критерий, по которому измеряется отличие сигнала от шума в определённых условиях [11].

Минимально разрешимая разность температур эквивалентна МРС для матрицы ИК-диапазона, когда мощность падающего на матрицу излучения представлена значением температуры.

Примечание. Все описанные выше определения справедливы для матриц, имеющих большое число пикселей. Их также можно применить для одиночных приёмников, при этом необходимо с каждого пикселя сделать достаточное количество выборок во времени.

Плоские волны и их применение в ИК-диапазоне

Электромагнитную волну считают плоской, если в области пространства, заполненного электромагнитным излучением, можно найти такую плоскость, во всех точках которой векторы Пойнтинга этого электромагнитного излучения имеют одинаковую величину и направление [5, 6, 8]. Теоретически электромагнитную волну нельзя считать плоской. Практически плоскую электромагнитную волну для измерений параметров матриц можно получить пятью способами:

- поместить излучающее тело очень далеко (например, электромагнитное излучение от далекой звезды, излучающей в ИК-диапазоне, вблизи Земли можно считать плоской волной);
- использовать приближение бесконечной излучающей плоскости в виде излучающего тела с плоской поверхностью, на которой источники ИК-излучения равномерно распределены и имеют одинаковую интенсивность по всем направлениям;
- поместить плоский источник ИК-излучения, равномерно излучающий энергию по всем направлениям, в фокальную плоскость оптической системы. Тогда в сопряжённом пространстве должна возникнуть плоская волна;
- поместить плоский источник ИК-излучения, равномерно излучающий энергию по всем направлениям, в любом удобном месте оптической системы. При этом плоскость излучения должна быть перпендикулярной оптической оси, а матрицу следует поместить в плоскости изображения также перпендикулярно оптической оси;
- поместить точечный источник ИК-излучения, равномерно излучающий энергию по всем направлениям, в фокус оптической системы. Тогда в сопряжённом пространстве должна возникнуть плоская волна.

Несмотря на то что любой из вышеперечисленных способов можно использовать в измерениях параметров матриц, наиболее точным, быстрым и приемлемым при автоматических измерениях является второй способ.

Рассмотрим бесконечную излучающую плоскость Пл, на которой источники ИК-излучения равномерно распределены и имеют одинаковую интенсивность (см. рис. 1). Докажем от противного, что такая бесконечная плоскость излучает плоскую волну. Предположим, что волна не плоская. Если это так, то в поле волны существует точка O, в которой результирующий вектор Пойнтинга **P** должен иметь отличную от нуля составляющую вектора вдоль излучающей плоскости (т.е. проекция вектора Пойнтинга **P** на эту плоскость должна быть отлична от нуля). Опустим из точки O на плоскость Пл перпендикуляр, который пересечёт плоскость Пл в точке O_P. Рассмотрим излучатель, расположенный в произвольно выбранной на плоскости точке, например A1. Пусть этот источник обладает произвольной диаграммой направленности и является когерентным.

Из рисунка 1 видно, что вектор Пойнтинга **P1** от источника в точке A1 имеет проекцию вектора Пойнтинга на плоскость, отличную от нуля. Однако всегда можно найти на прямой, определяемой отрезком O_PA1, такую точку A2, чтобы $O_PA1 = O_PA2$, в которой располагается источник, имеющий проекцию вектора Пойнтинга на плоскость, отличную от нуля и равную по величине, но противоположную по направлению проекции от точки A1. Результирующая проекция вектора Пойнтинга от этих точек на плоскость складывается по принципу суперпозиции и равна нулю.

Но, как видно из рисунка 1, бесконечная излучающая плоскость и все источники на ней симметричны относительно любого поворота вокруг прямой, проходящей через отрезок O_PO, т.е. при повороте на любой угол физическая ситуация не изменится и для всех остальных точек, которые получаются из точки A1 поворотами плоскости от 0 до 180°. Поскольку точка A1 выбрана произвольно, то из свойства симметрии следует, что равенство нулю составляющей суммарного вектора Пойнтинга справедливо для всех точек плоскости A.

Для однородных излучающих плоских тел с конечными размерами можно считать, что волна, которую они излучают, является плоской, если расстояния от плоскости до точки наблюдения (измерения) много меньше размеров самой излучающей плоской поверхности. Это приближение называется приближением бесконечной плоскости и используется автором для создания модели равномерной засветки пикселей при измерении параметров матриц.

Описание установки для измерений в ИК-диапазоне чувствительности и минимального разрешимого сигнала матрицы

Чувствительность матрицы, сигнал, эквивалентный шуму, или минимальный разрешимый сигнал, наряду с однородностью пикселей, входящих в матрицу, и, следовательно, одинаковостью их откликов и других характеристик являются основными параметрами, которые характеризуют матрицу. Из определений, сделанных выше, следует, что достаточно провести измерение одного, двух или даже части состояний матрицы, чтобы определить необходимые параметры матрицы. Для разного типа матриц измерение состояния матрицы происходит с использованием различной аппаратуры. Далее, для понимания результатов эксперимента в ИК-диапазоне описывается только техника проведения измерений в ИК-диапазоне.

Как следует из определения состояния матрицы, необходим источник плоской электромагнитной волны ИК-диапазона. Для этого используется излучение АЧТ с плоской поверхностью в приближении бесконечной излучающей плоскости. На рисунке 2 показана блок-схема установки для измерения состояния матрицы. Корпус матрицы, обозначенный чёрным цветом, вплотную прижимается к плоской поверхности АЧТ, излучающей плоскую волну. Эта плоская волна достигает пикселей матрицы и равномерно их засвечивает. Далее, с помощью устройств выборки-хранения в памяти сохраняются состояния матрицы. После этого устройством обработки вычисляются и визуализируются параметры матрицы.

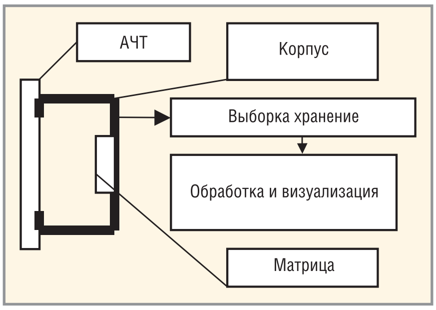

Рис. 2. Блок-схема установки для измерения состояния матрицы

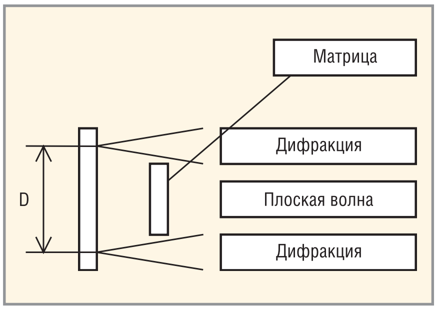

Рис. 3. Отклонение волны от плоской вследствие ограничения её размеров

На рисунке 3 показано, что вследствие ограничения размеров излучения, прошедшего через входное окно корпуса матрицы, плоская волна становиться не плоской. Отклонение волны от плоской, вследствие ограничения её размеров, описывается теорией дифракции. Однако дифракционные искажения, которые изображены в виде дифракции Фраунгофера, матрицу, как правило, не затрагивают, и ими можно пренебречь.

Второй задачей после измерения параметров матрицы является получение изображений, когда ИК-матрица находится в составе оптической системы. На рисунке 4 изображена блок-

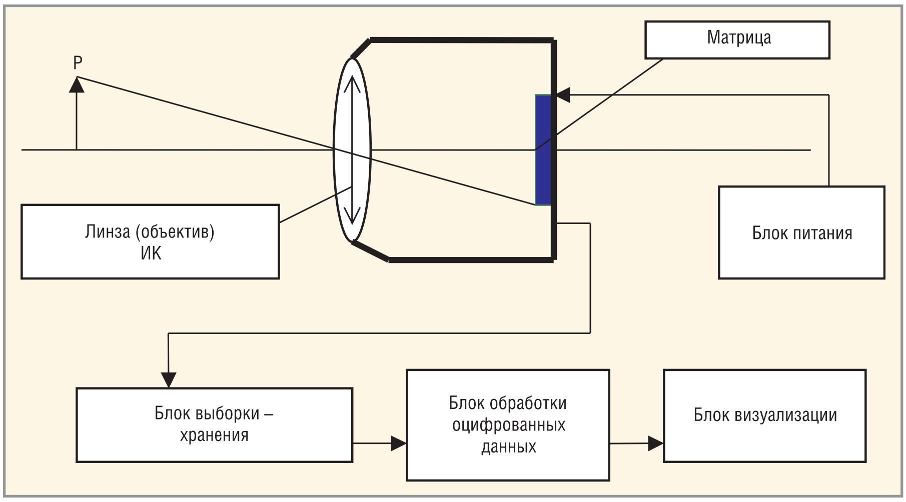

Рис. 4. Блок-схема измерительной установки для получения изображения в ИК-области

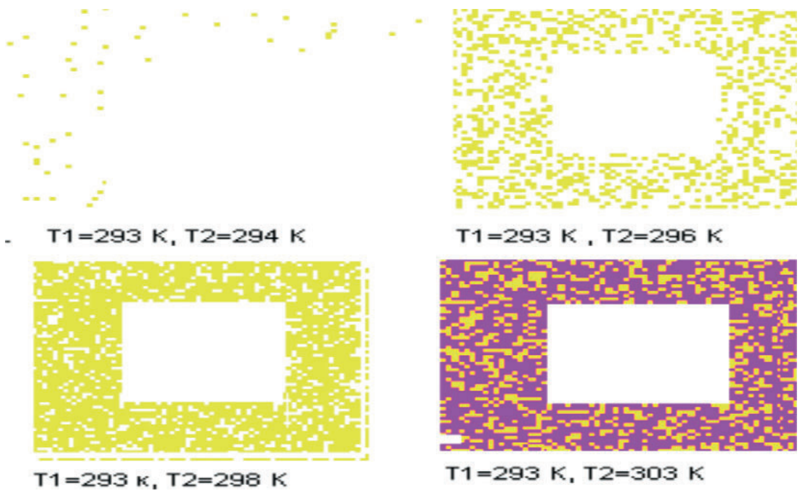

Рис. 5. Моделирование изображения квадрата, полученного с использованием двух состояний матрицы

схема измерительной установки для получения изображения в ИК-области.

Моделирование измерений параметров матриц в ИК-диапазоне

Чтобы промоделировать измерения параметров матриц, необходим источник плоской волны в ИК-области и матрица. С этой целью в режиме моделирования матрицы был разработан болометр с ИК-чувствительной площадью 20 × 20 мкм и толщиной 5 мкм.

Расчёты показали, что болометр имеет чувствительность 7,56E-4 В/град при температуре 373°К, 2,23E-3 В/град при температуре 273°К и 1,33E-2 В/град при температуре 77°К. Из этих болометров с периодом 40 мкм была составлена матрица 100 × 100. Таким образом, размеры этой матрицы составили 16 мм^2, что теоретически достаточно для построения искусственного «глаза» робота.

Следует отметить, что разработанная автором болометрическая матрица при практическом осуществлении обладает общими недостатками болометрических матриц:

- требуются достаточно прочные материалы для прослойки между пикселями и подложкой, имеющие низкий коэффициент теплопроводности;
- материал, из которого состоял болометр, должен иметь высокий коэффициент поглощения ИК-излучения.

Для моделирования матрицы болометров был выбран материал прослойки, имеющий теплопроводность 0,04 Вт/м/град, и материал, обладающий коэффициентом поглощения ИК-излучения 10000 см$^{-1}$. Коэффициент поглощения ИК был подогнан под размеры пикселя, остальные параметры – реальные. Поэтому можно утверждать, что при указанных выше коэффициентах моделирование матрицы и полученные результаты должны быть близки к наблюдаемым на практике. Более подробную информацию о микроболометрических матрицах можно найти в [12].

Предположим, что для измерения чувствительности матрицы и минимального разрешимого сигнала (или сигнала, эквивалентного шуму), или минимальной разрешимой разности температур, не требуется измерять десятки состояний матрицы при одном значение сигнала, затем десятки состояний матрицы при другом значении сигнала и т.д., и только затем находить функции от этих состояний. Достаточно измерить по одному состоянию матрицы при разных температурах и по этим данным вычислить чувствительность матрицы и минимальную разрешимую разность температур и другие параметры.

Некоторые результаты применения эргодической гипотезы для ИК-матрицы, полученной и описанной моделированием, показаны в таблице, где средние значения во времени при вычислении параметров матрицы суммированием по нескольким десяткам состояний матрицы заменены средними статистическими значениями по двум состояниям. Чтобы получить шум в падающей волне и ввести несовершенства матрицы, к падающей от АЧТ волне со средней мощностью W была сделана добавка в виде случайной величины с равномерным распределением и амплитудой 0,05W, а к значению средней чувствительности матрицы была сделана добавка в виде случайной величины с равномерным распределением и амплитудой 0,05 от среднего значения чувствительности.

На рисунке 5 показаны изображения квадрата, который получался с использованием двух состояний матрицы, первое из которых при моделировании имело большую температуру,

Результаты применения эргодической гипотезы для ИК-матрицы, полученной и описанной моделированием

Параметр	Единицы измерения	Номер состояния			
		1	3	5	9
SH	вольт	0,000910	0,000915	0,000918	0,000909
CH	вольт/град	0,0006103	0,0006125	0,0006117	0,0006103
ISN	град	1,49	1,49	1,50	1,48

чем второе, и пропускалось через квадратное отверстие. Температура материала (мирры), в котором было отверстие, совпадало с температурой первого состояния. Из-за большой амплитуды случайных величин, введённых при моделировании, разрешение составляет приблизительно 3°К.

Выводы

Для измерений параметров матриц различной природы, таких как чувствительность, минимально разрешимый сигнал и другие, а также для обработки видеосигналов и построения изображений, которые могут быть использованы при создании систем технического зрения, можно использовать введённые в статье понятия состояний матрицы, функции, определённые на этих состояниях, и эргодическую гипотезу. При этом, измеряя состояния матрицы, являющиеся откликами на внешние воздействия, и вычисляя функции, определённые на этих состояниях, можно определить параметры матрицы или построить изображение.

Например, если вывести на монитор распределение интенсивности, которое соответствует элементам матрицы отклика $\{A_{IJ}\}$, получится изображение, соответствующее этому состоянию. Если вывести на монитор распределение интенсивности, соответствующее функции двух состояний матрицы, которая вычисляется как разность откликов двух состояний $\{A^2_{IJ}\} - \{A^1_{IJ}\}$, получится изображение, соответствующее функции, определённой на двух состояниях.

На рисунке 5 показаны изображения, полученные по второму способу. Использование эргодической гипотезы позволяет сократить количество вычислений и точнее определять параметры конкретных матриц. Сокращение количества вычислений актуально при обработке информации, оцифрованной с матрицы в реальном времени, в частности, при построении систем технического зрения роботов.

Литература

1. *Зеленов Г.Я.* Способ измерения и обработки результатов измерений для получения чувствительности, сигнала, эквивалентного шуму, и минимально разрешимого сигнала для матриц различной размерности и чувствительных элементов различной природы. Заявка на изобретение от 29.12.2004.
2. Справочник по инфракрасной технике. Мир, 1989.
3. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. Машиностроение, 1986.
4. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Наука, 1979.
5. Общий курс физики. Оптика. Наука, 1979.
6. Общий курс физики. Электричество. Наука, 1979.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Статистическая физика. Часть 1. Наука, 1976.
8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Теория поля. Наука, 1973.
9. *Розанов Ю.А.* Случайные процессы. Краткий курс. Наука, 1971.
10. Физическая энциклопедия, Том 5. Советская энциклопедия, 1988.
11. Теория информации и её приложения. Под ред. *А.А. Харкеевича*. Физматгиз, 1959.
12. *Андрюшин С.Я., Кравченко Н.В., Кулыманов А.В.* и др. Состояние разработок микроболометрических матриц в ГНЦ РФ «НПО "Орион"». Прикладная физика. 2000. № 5. С. 5–17.