

УДК 621.384.3

Коррекция геометрических искажений изображения в тепловизорах с использованием сканеров

В. В. Демин, А. Н. Кошарновский

Государственное унитарное дочернее предприятие "Научно-исследовательский институт точного электронного приборостроения", Москва, Россия

Е. В. Дегтярев

22-й Центральный научно-исследовательский и испытательный институт МО РФ, г. Мытищи, Россия

Представлен один из алгоритмов коррекции геометрических искажений изображения в тепловизорах, обусловленных особенностями сканирующей системы. Описана практическая реализация этого алгоритма в блоке обработки информации тепловизора.

В настоящее время в тепловизорах получили широкое применение системы сканирования плоскости объекта с использованием линейки фотоприемников, вращающегося барабана (пирамиды) с наклонными зеркальными гранями, качающимся зеркалом и т. д. При последующем воспроизведении сигнала на мониторе с прямоугольным растром полученное тепловизионное изображение сопровождается характерными геометрическими искажениями.

Поскольку плоскость зеркала каждой грани пирамиды при вращении описывает коническую поверхность, то каждый фотоприемник в линейке при отражении излучения от этой грани сканирует по линии пересечения этого конуса с вертикальной плоскостью объекта. Эта линия представляет собой параболу. Все фотоприемники в линейке в течение одного скана сканируют на плоскости объекта площадь, ограниченную семейством из n парабол по числу фотоприемников. Пример такого растра для одного скана показан на рис. 1. При смене зеркальной грани такой пирамиды, что сопровождается изменением угла ее наклона относительно оси линейки фотоприемников, также изменяются параметры нового семейства парабол.

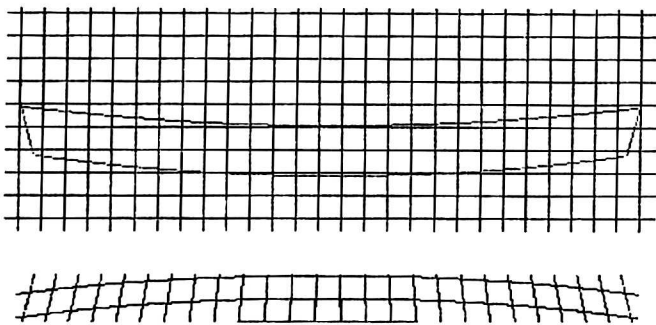


Рис. 1. Объект в виде ортогональной сетки с наложенным полем зрения сканера (1 скан) и геометрические искажения изображения на мониторе

Из-за возрастающего угла наклона линейки фотоприемников от 0 до максимального на краях сканов различные фотоприемники в течение скана проходят на плоскости объекта за одно и то же время (длительность скана) различные расстояния, т. е. пространственная протяженность одного пикселя в разных областях плоскости объекта различна. Таким образом, при воспроизведении полученных сигналов на мониторе с прямоугольным растром можно наблюдать два вида искажений: горизонтальные линии искривляются и приобретают вид парабол, а вертикальные линии приобретают наклон тем больший, чем далее от центра поля зрения они располагаются.

Коррекция геометрических искажений осуществляется посредством внесения в выводимое

изображение "обратных геометрических искажений" в процессе цифровой обработки данных.

Реальное тепловизионное изображение с указанными искажениями при выводе на монитор представлено на рис. 2.

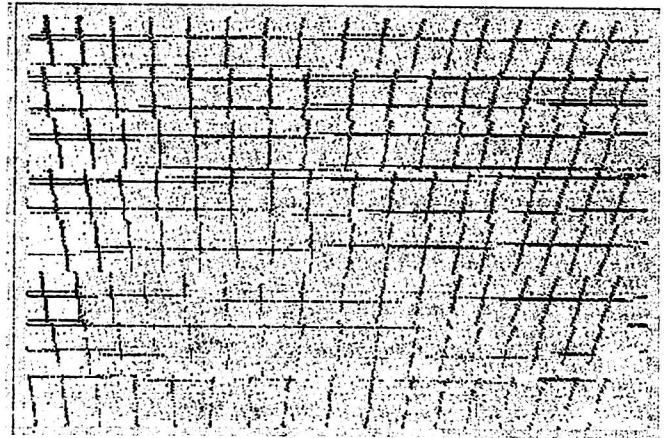


Рис. 2. Тепловизионное изображение ортогональной нагретой сетки

При сканировании плоскости объекта не по прямой линии, а по параболе точки съема информации с отдельных чувствительных элементов линейки фотоприемников (пиксели), поступающие последовательно на монитор, соответствуют не одной горизонтальной линии (строке) плоскости объекта, а различным, т. е. получают смещение по оси Y тем большее, чем далее от центра поля зрения они находятся.

Если известны параметры семейств парабол, составляющих полный растр, то при формировании скорректированного изображения необходимо смещать по оси Y соответствующие пиксели нескорректированного изображения так, чтобы вернуть их на исходное место. При этом они вернуться на те места, откуда были получены при сканировании параболическими линиями. Поскольку длина линий сканирования на плоскости объекта для всех сканов различна (хотя и включает в себя одно и то же число пикселей по горизонтали), пиксели, поступающие последовательно на монитор, получают также некоторое смещение по оси X .

Параметры семейств парабол, составляющих полный растр, могут быть известны из расчета оптико-механической системы тепловизора или из расчета ее модели. С достаточно высокой степенью точности эти параметры можно получить аналитическим путем, оценивая геометрические искажения тестовой ортогональной сетки (миры), помещенной перед тепловизором. Правильность восстановленных уравнений парабол можно проверить по точности устранения геометрических искажений изображения в виде той же ортогональной сетки с таким же или другим

периодом следования горизонтальных и вертикальных линий.

В качестве параметров семейств парабол в предлагаемой реализации алгоритма коррекции геометрических искажений использовались результаты геометрических измерений тепловизионного изображения ортогональной сетки (на прямоугольной рамке натянута нагревающаяся проволока), представленного на рис. 2. При этом по результатам обсчета составлялось уравнение первой, "главной", параболы, а остальные параболы семейства получались с учетом того, что линейка фотоприемников наклонена на максимальный угол α .

В общем виде уравнения для всех семейств парабол можно представить в следующем виде:

$$Y_n = \frac{n \cdot \cos \alpha - a_k - n}{(X_0/2 - n \cdot \sin \alpha)^2} (X_m - X_0/2)^2 + b_k + n,$$

- где n — порядковый номер параболы;
 X_m — координата по оси X m -го пикселя;
 X_0 — число пикселей в строке;
 a_k и b_k — параметры для семейств парабол тепловизора;
 k — порядковый номер скана.

Параболы симметричны относительно центра экрана.

Процесс моделирования геометрических искажений при сканировании по параболическим линиям заключается в следующем. На рис. 3 показаны первая и последняя параболы для одной и той же грани зеркальной пирамиды сканера, ось симметрии семейства парабол и наклонная линия, ограничивающая эти параболы и расположенная под углом α к оси симметрии этих парабол, т. е. определяющая угловое поле зрения сканера относительно оси симметрии.

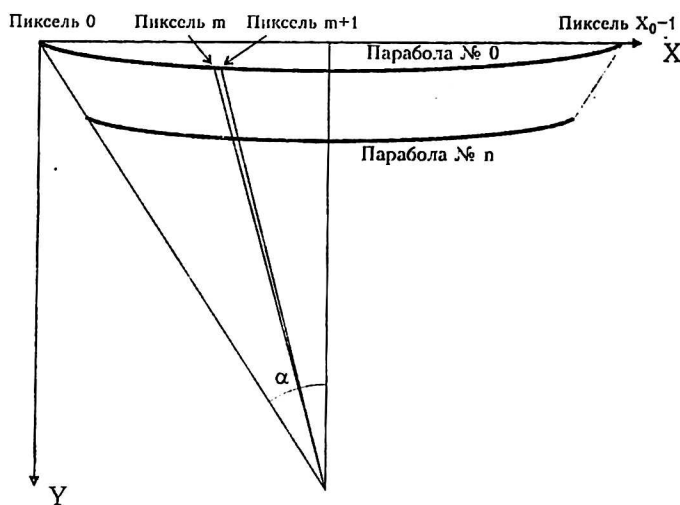


Рис. 3. Первая и последняя параболы одного полного скана

Последовательное попиксельное сканирование изображения в виде ортогональной сетки производится по параболическим линиям. Переход к следующему пикселю на параболической линии происходит при угловом изменении на $2\alpha/X_0$ пикселей. Таким образом, необходимо найти координаты точки пересечения наклонной линии с параболической линией и определить, в пределах какого пикселя изображения сетки находится эта точка пересечения (рис. 4). На протяжении нескольких угловых перемещений призмы пиксели на параболе будут находиться в пределах соответствующих пикселей на ортогональной сетке (с теми же координатами), затем пиксели первой параболической линии будут находиться в пределах второй строки пикселей на ортогональной сетке и т. д. Таким образом, можно составить некую таблицу с размерностью X_0 на n по количеству пикселей в строке и количеству строк, в каждой ячейке которой находятся поправки Δx_{nm} и Δy_{nm} к координатам по осям X и Y , на которые необходимо скорректировать координаты соответствующих пикселей для того, чтобы устранить геометрические искажения, т. е. вернуть пиксели на их места, как на исходном изображении.

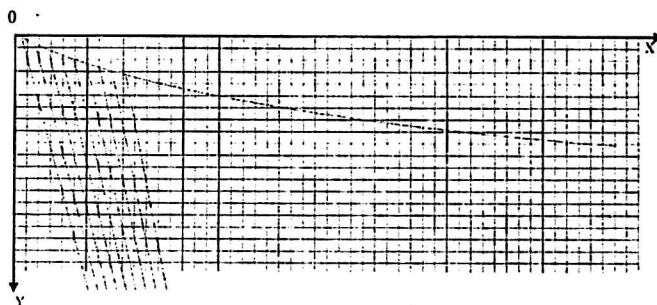


Рис. 4. Сканирование ортогонального раstra по параболической линии (Масштаб по оси Y для наглядности увеличен)

Для поиска этих точек пересечения решается система уравнений — параболической и наклонной линий

$$Y_n = \frac{n \cdot \cos \alpha - a_k - n}{(X_0/2 - n \cdot \sin \alpha)^2} (X_m - X_0/2)^2 + b_k + n;$$

$$Y_m = tX_m + X_0/2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - t \right);$$

$$t = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha((X_0 - 1) - 2m)/X_0)},$$

- где n — порядковый номер параболы;
 m — порядковый номер пикселя для левой половины кадра.

Для правой половины кадра величины смещений по оси Y те же, что и для левой, а величины смещений по оси X те же по абсолютной величине, что и для левой, но другого знака. Это

объясняется геометрической симметрией параболических линий относительно вертикальной оси, проходящей через середину кадра. В результате расчетов получаем величины Δx_{nm} и Δy_{nm} , которые представляют собой значения поправок к адресам пикселей X_{nm} и Y_{nm} для корректировки геометрических искажений.

Из рис. 4 видно, что последовательные точки пересечения наклонных прямых с шагом $2\alpha/X_0$ (угол наклона этих прямых = $\alpha - m \cdot 2\alpha/X_0$) с соответствующими параболическими линиями (в этот момент в данной точке происходит оцифровка пикселя) смещаются по оси Y (для первых нескольких пикселей на параболической линии координаты Y совпадают с соответствующими координатами Y пикселей ортогональной сетки, для нескольких следующих произошло смещение на 1 по оси Y и т. д.). То же самое происходит и по оси X (первые несколько пикселей на параболической линии совпадают по адресу X с соответствующими пикселями на ортогональной сетке, а для некоторого следующего пикселя на параболической линии произошло смещение на 1 по оси X). Таким образом, этот пиксель исходного изображения в ортогональной сетке будет утерян и при восстановлении исходного изображения на этом месте будет пропуск-пробел, который можно будет заполнить фиктивной информацией по какой-либо методике (полусумма двух соседних пикселей, весовая сумма четырех или девяти соседних пикселей и т. п.). Расчеты, а также примеры восстановленных изображений с исправленными геометрическими искажениями показывают, что такие утерянные пиксели располагаются на краях восстановленного изображения справа и слева, всегда одиночно, не образуя связных групп, и их количество невелико. Например, таких утерянных пикселей в одном из рассмотренных изображений с форматом 400×320 было не более 190, что составляет от общего числа пикселей в 128 тыс. всего 0,15 %. Для формата 384×256 в другом случае таких утерянных пикселей было не более 170, т. е. 0,17 % для общего числа пикселей в 98 тыс.

Для реальных сканеров точность восстановления исходного изображения зависит от точности восстановления уравнений парабол. Эта точность может быть повышена после получения скорректированных изображений от эталонных изображений в виде ортогональной сетки путем соответствующего изменения (подгонки) коэффициентов парабол.

Кроме того, при работе с реальными изображениями были обнаружены и некоторые другие виды искажений, обусловленные несовершенством изготовления и юстировки оптико-механической системы тепловизора. Изображение по-

лучено на тепловизоре, в котором при первом обороте зеркальной пирамиды сканируются нечетные сканы, а при втором — четные сканы. Эти искажения отчетливо видны на рис. 5.



Рис. 5. Геометрические искажения в реальном тепловизионном изображении

Из-за того, что в горизонтальной плоскости зеркальные грани могут быть расположены не точно под углами, кратными $2\pi/N$, где N — число граней, а заметно от них отличающимися, сканы будут смещены относительно друг друга по горизонтали (сканы 1 и 5, 2 и 6).

Угол поля зрения по вертикали должен быть равен сумме равных углов полей зрения всех сканов, а поля зрения сканов при втором обороте пирамиды при соответствующем повороте кадрового зеркала должны заполнять промежутки между сканами первого оборота пирамиды. Это обеспечивается тогда, когда в вертикальной плоскости углы наклона зеркальных граней отличаются на угол β/N , где β — угол поля зрения по вертикали, а при начале сканирования при втором обороте пирамиды кадровое зеркало повернулось на такой же угол. Если же эти углы из-за неточности изготовления и юстировки заметно отличаются от указанных, будут наблюдаться смещения по вертикали — наложения полей зрения отдельных сканов или разрывы между ними (1-й и 5-й сканы — наложение, 5-й и 2-й сканы — разрыв).

Еще один вид искажений хорошо заметен на рис. 2. Из-за того, что при вращении пирамиды за время одного скана кадровое зеркало поворачивается на некоторый угол, все поле зрения одного скана повернуто по часовой стрелке на этот угол. При воспроизведении изображения на экране горизонтальные линии приобретают наклон на этот же угол, но против часовой стрелки (см. 5-, 2- и 6-й сканы на рис. 2).

Если линейка фотоприемников имеет наклон в плоскости, проходящей через ось вращения и грань пирамиды, это приводит к симметричному изменению угла α . При наличии наклона в плоскости, перпендикулярной предыдущей,

происходит несимметричное изменение угла α (см. рис. 2).

Реально имеют место сочетания всех видов искажений в той или иной степени, и при расчетах поправок для координат необходимо вносить соответствующие математические выражения для их учета и корректировки.

Аппаратная реализация рассмотренного алгоритма в модуле электронной обработки информации (ЭОИ) заключается во введении в него двух ОЗУ по 128 К каждое для хранения поправок Δx_{nm} и Δy_{nm} к адресам X_{nm} и Y_{nm} , причем разрядность этих ОЗУ по входу, равная 17, определяется тем, что на адресные входы подаются 9 разрядов адреса (384 пикселя) по оси X и 8 разрядов адреса (256 строк) по оси Y . Кроме того, в схему добавляются два сумматора (по оси X и по оси Y), на которых происходит суммирование текущих адресов и поправок, поступающих из соответствующего ОЗУ, на адресные входы которых также поступают текущие адреса. В результате с выходов сумматоров (суммирование производится с учетом знака поправки) снимаются скорректированные адреса, т. е. адреса, по которым в ОЗУ перед ЦАП необходимо разместить текущие пиксели изображения для исправления геометрических искажений.

Возможны три варианта аппаратной реализации рассмотренного алгоритма. В первом варианте в ПЗУ модуля предварительно записываются массивы поправок абсолютных адресов изображения. При начальной загрузке процессор считывает эти данные и переписывает эти массивы в два ОЗУ модуля. При пересылке данных вследствие суммирования поправок с текущими адресами происходит перемещение пикселей с исправлением геометрических искажений, поскольку запись этих пикселей в конечное изображение происходит по новым — исправленным адресам. В этом варианте требуются дополнительные ПЗУ и ОЗУ объемом по 128 Кбайт (две пары) для всего кадра, а также описанные выше сумматоры-вычитатели.

Во втором варианте в ПЗУ модуля объемом 128 Кбайт предварительно записывается массив уже исправленных абсолютных адресов, причем разрядность по выходу равна 17, что определяется величиной 9 разрядов по оси X плюс 8 разрядов по оси Y или же возможно использование двух ПЗУ размерностью 9 и 8 разрядов. Затем так же, как и в первом варианте, этот массив (массивы) переписывается в ОЗУ такого же объема. При пересылке данных текущие адреса подаются на адресные входы ОЗУ, на выходе которых устанавливаются исправленные адреса. Этот вариант требует для своей реализации ОЗУ и ПЗУ с 9-разрядным выходом.

В третьем варианте в программное ПЗУ модуля заносятся параметры семейств парабол и алгоритм расчета поправок. Далее при начальной загрузке процессор по имеющимся данным рассчитывает величины поправок, заносит их в ОЗУ модуля, и при поступлении данных так же, как и в первом варианте, формирует новые абсолютные адреса перекодировки изображения с целью корректировки геометрических искажений.

На практике был реализован первый вариант, причем исправленные изображения были аналогичны показанному на рис. 6.



Рис. 6. Демонстрация корректировки геометрических искажений реального тепловизионного изображения

Заключение

Выше описан алгоритм корректировки геометрических искажений, который позволяет в значительной степени устранить эти искажения. Аппаратная реализация должна осуществляться в модуле ЭОИ.

Представленный алгоритм позволяет практически полностью корректировать геометрические искажения тепловизионных изображений, полученных для сканеров, построенных с применением линейки фотоприемников, вращающегося барабана (пирамиды) с наклонными зеркальными гранями и качающимся зеркалом.

Как было указано, в процессе восстановления изображения появляются пиксели с отсутствующей информацией и показано, что при этом существенной потери качества изображения не происходит. Из рис. 6 также видно, что если исходное изображение получено со сканера с разрывами между сканами, то такие разрывы при восстановлении изображения не устраняются. Однако такие искажения вносятся неприменяемым алгоритмом, поскольку информация об этих участках исходного изображения отсутствует при ее приеме со сканера.

Некоторые искажения исходного изображения могут быть частично или полностью устранены посредством дополнительной юстировки оптико-механической системы тепловизора (например, разрывы изображения).

Файл с поправками для адресов является своего рода паспортом для данного сканера тепло-

визора и будет использоваться при дальнейшей его эксплуатации.

Корректировать таким образом можно практически любые геометрические искажения различных сканирующих систем (и в видимом, и в инфракрасном диапазонах), для которых эти искажения можно представить в аналитическом виде.

Correction of image geometrical distortions in IR imagers with scanning systems

V. V. Demin, A. N. Kosharnovsky

22-nd Central Research and Test Institute of Defense Ministry, Mytishchy, Russia

E. V. Degtyarev

One of algorithms of image geometrical distortions (ride on a particularities of scanning systems) correction in IR imagers is represented. The practical realization of the algorithm in the data processing block of the IR imager is described.