

КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КАНАЛА

П.С.Соболев, Б.В.Черняк, М.Н.Петров*

CORRECTION OF THE INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE OPTICAL SYSTEM OF THERMAL IMAGING CHANNEL

P.S.Sobolev, B.V.Chernyak, M.N.Petrov*

ООО «НПО ПКРВ», Великий Новгород, pavsobolev@yandex.ru

*Институт электронных и информационных систем НовГУ

Представлены две методики коррекции влияния температуры окружающей среды на оптическую систему тепловизионного канала. Первая обусловлена температурным изменением свойств оптики, а именно свойств линз объектива. Вторая вызвана проявлением так называемого эффекта Нарцисса, связанного с переотражением падающего потока излучения в оптических системах с использованием зеркал. Для коррекции первого эффекта, приводящего к перенасыщению пикселей ИК изображения и, как следствие, появлению на изображении фрагментов с постоянным контрастом, предложена методика, связанная с подбором времени экспозиции. Для минимизации второго эффекта используется фиксация сигнала падающего потока излучения в 12 опорных точках с последующим вычислением матрицы нормировочных коэффициентов для компенсации паразитных засветок для каждого пикселя ИК сенсора.

Ключевые слова: калибровка ИК ФПУ, коррекция влияния температуры окружающей среды, переотражение падающего потока, эффект Нарцисса, выравнивание чувствительности, геометрический шум

This paper presents two methods for correcting the influence of ambient temperature on the optical system of a thermal imaging channel. The first is due to temperature changes in the properties of the optics, namely the properties of the objective lenses. The second is caused by the manifestation of the so-called Narcissus effect associated with the re-reflection of the incident radiation flux in optical systems using mirrors. For the correction of the first effect, leading to a super saturation of the IR image pixels, and as a result, the appearance of fragments with constant contrast in the image, a technique has been proposed related to the selection of the exposure time. To minimize the second effect, a fixation of the incident radiation flux signal at 12 reference points is used, followed by the calculation of the matrix of normalization coefficients to compensate for spurious illumination for each pixel of the IR sensor.

Keywords: calibration of infrared (IR) photodetectors, correction of the influence of ambient temperature, re-reflection of the incident flux, the Narcissus effect, sensitivity equalization, geometric noise

Введение

Данная работа является продолжением предыдущей работы [1], где была рассмотрена методика калибровки инфракрасных фотоприемных устройств (ИК ФПУ) путем коррекции неравномерности чувствительности отдельных пикселей. Здесь приведена методика коррекции влияния температуры окружающей среды на оптическую систему тепловизионного канала, которая в значительной степени определяет точность работы всей ИК камеры.

Для фокусирования теплового излучения на инфракрасное фотоприемное устройство используются тепловизионные объективы с линзами из специальных оптических материалов, для изготовления которых чаще всего применяются кремний и германий. Данные материалы наиболее близки к совершенству, поскольку обладают рядом преимуществ относительно других.

Существует множество вариантов построения оптических тепловизионных систем, но по принципу построения их можно разделить на два вида: прямые и с использованием зеркал.

В данной работе затронуты два типа проблем, связанных с воздействием температуры на оптическую систему ИК камеры, построенной с использованием зеркал:

— первая обусловлена изменением свойств оптики, а именно свойств линз объектива;

— вторая связана с проявлением так называемого эффекта Нарцисса [2], возникающего в оптических системах тепловизионных каналов с использованием зеркал.

Постановка эксперимента

В качестве источника излучения используется абсолютно черное тело (АЧТ) с рабочим диапазоном установочных температур от минус 20 до плюс 110°C. Функции фотоприемного устройства выполняет матричное ФПУ с разрешением 640*512 пикселей фирмы «Sofradir» с установленным объективом, в конструкции которого применены два зеркала (рис.1).

Тепловизионная камера с объективом установлена в климатическую камеру. Перед входной линзой объектива установлен источник излучения АЧТ, как показано на рис.2.

Измерения проводились путем установки температуры источника излучения АЧТ (50°C, 40°C, 30°C, 20°C и 10°C) с последующим варьированием температуры климатической камеры в диапазоне 10-50°C с шагом 10°C. Для каждого эксперимента считывались кадры ИК изображений.

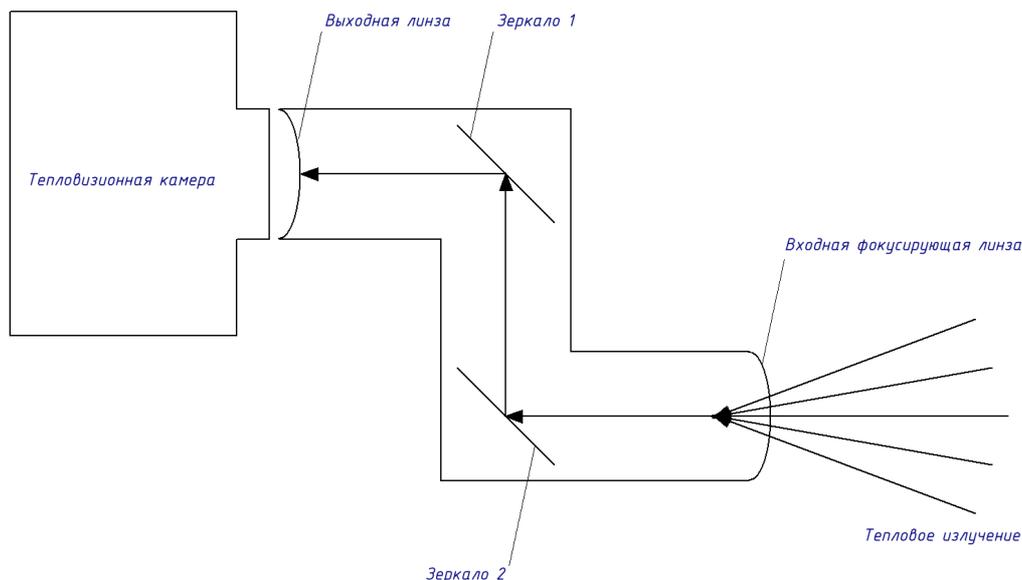


Рис.1. Схема объектива с двумя отражающими зеркалами



Рис.2. Схема установки для проведения эксперимента

Обработка результатов

Полученные кадры подвергались обработке. В рамках данного эксперимента в расчет брались 100 кадров для каждой установленной на АЧТ температуре. Далее производится отбраковка пикселей по таким параметрам, как амплитуда пикселя, шум пикселя, нелинейность отклика пикселя [1].

При изменении температуры в климатической камере свойства оптики, а именно свойства линз объектива меняются. Это связано с тем, что линзы выполнены из полупроводникового материала, крайне чувствительного к температуре.

В данном случае при изменении температуры в климатической камере на каждые 10°C постоянная составляющая измеренного сигнала от источника излучения АЧТ меняется на 10-20%. При увеличении температуры она растет, а при понижении температуры падает.

На рис.3 представлены фрагменты выходного сигнала с МФПУ (построчно), измеренные при постоянной температуре источника излучения АЧТ ($T = 30^{\circ}\text{C}$), но при разных температурах климатической камеры: 10°C (нижний график) и 30°C (верхний график).

Из рисунка видно, что при увеличении температуры в климатической камере с 10°C до 30°C постоянная составляющая выходного сигнала с МФПУ увеличилась на 16%.

Для коррекции влияния температуры на характеристики линз объектива предлагается следующий алгоритм:

1. Для каждого МФПУ существуют максимальный и минимальный уровни выдаваемого сигнала. Измеряем максимальный уровень сигнала (U_{max}) с МФПУ на заданной максимальной температуре в климатической камере при определенной температуре источника излучения АЧТ.

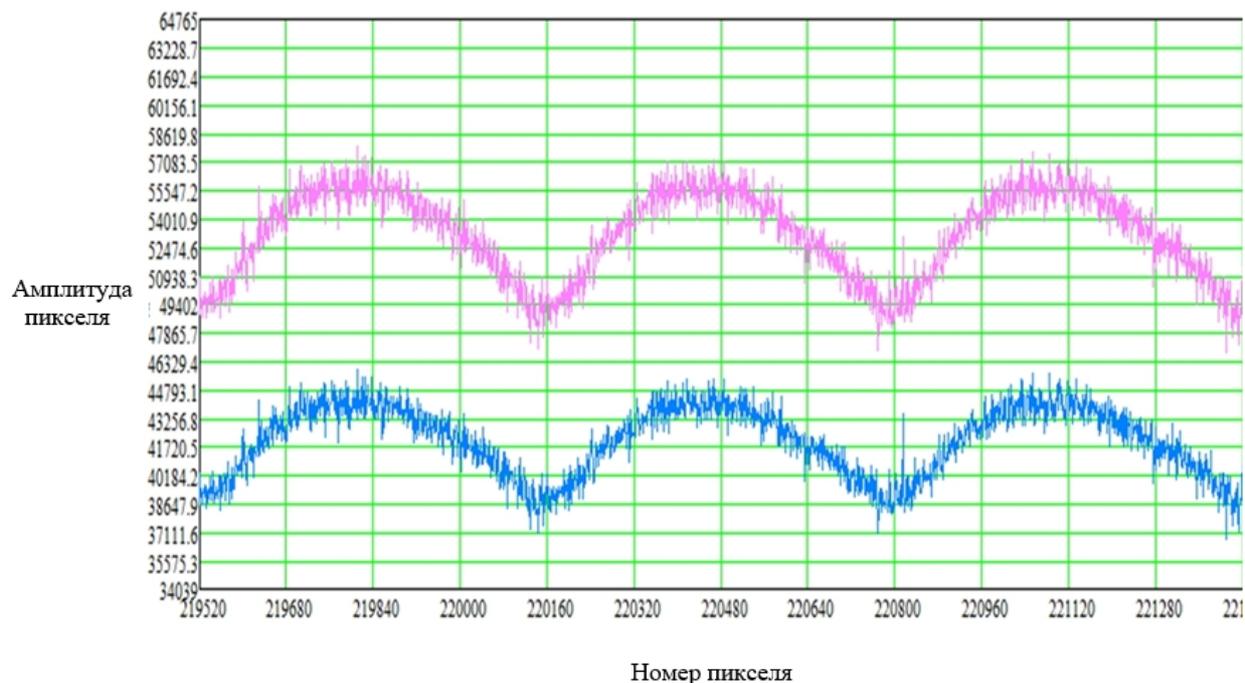


Рис.3. Измеренный выходной сигнал с МФПУ (фрагмент кадра, снятый построчно) для двух температур: 10°C (нижний график) и 30°C (верхний график)

2. Не меняя температуру источника излучения АЧТ, измеряем уровень сигнала U_{room} с МФПУ при комнатной температуре.

3. Вычисляем уровень сигнала, выше которого будет наблюдаться перенасыщение пикселей ИК изображения:

$$U_{\text{lim}} = U_{\text{max}} - U_{\text{room}}$$

4. Далее подбираем время экспозиции с учетом определенного выше уровня сигнала U_{lim} .

Предложенный алгоритм используется при калибровке тепловизионной камеры для предотвращения эффекта перенасыщения пикселей ИК изображения. Результатом проявления указанного эффекта может быть появление на изображении фрагментов с постоянным контрастом, что приводит к потере информации. Это создает проблемы с корректной идентификацией объектов интереса, что недопустимо в боевых условиях.

Еще одним следствием изменения температуры во время работы тепловизионного прибора является нагрев окружающих его конструктивных элементов, что приводит к испусканию «паразитного» ИК излучения. Часть этого излучения отражается обратно на сенсор последней оптической компонентой объектива, выступающей в качестве зеркала. Результатом этого является появление в центральной части наблюдаемого на дисплее тепловизора изображения колец или пятен. Это так называемый «эффект Нарцисса». В большей степени данный эффект проявляется при перефокусировке объектива (вследствие изменения линейного расстояния между сенсором и последней оптической компонентой объектива), когда происходит максимальная фокусировка «паразитного» излучения на сенсор при наблюдении за низко контрастными объектами с равномерным распределением излучения (например, стена или безоблачное небо).

В нашем случае в конструкции объектива присутствуют зеркала, которые при изменении температуры окружающей среды начинают переотражать паразитное ИК излучение и фокусировать его на фотоприемник. В случае незначительной разницы в температурах источника излучения и тепловой камеры влиянием данного эффекта можно пренебречь. Однако в экстремальных условиях данный эффект (эффект Нарцисса) приводит к появлению в центре изображения пикселей с повышенной яркостью (рис.4).

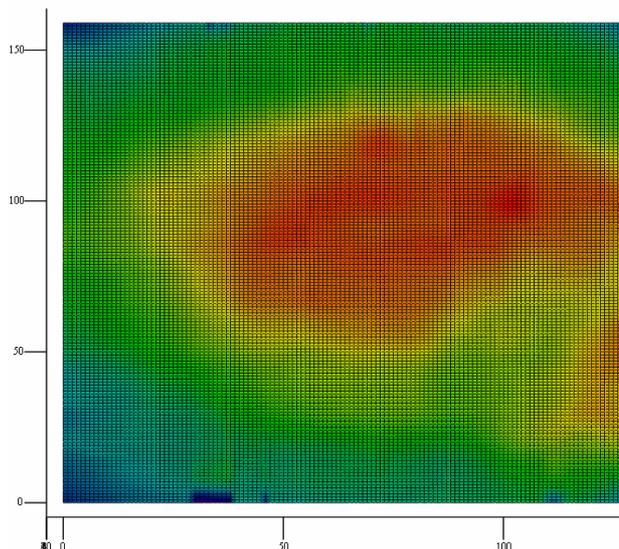


Рис.4. Проявление эффекта Нарцисса

В отличие от температурного изменения постоянной составляющей сигнала, устраняемого с помощью калибровки камеры, для коррекции эффекта Нарцисса требуется разработка специальной технологии.

В данной работе для минимизации влияния эффекта Нарцисса предлагается следующий алгоритм.

1. Для реализации программной компенсации эффекта Нарцисса сохраняем значения входного сигнала падающего потока излучения в 12 опорных точках, соответствующих температуре корпуса объектива (T_d) в диапазоне температур от минус 50°C до плюс 60°C с шагом 10°C. Температуры этих точек определяются выражением:

$$T_n = (n - 1) \times 10 - 50,$$

где n принимает значения от 1 до 12.

2. Используя значение температуры термодатчика T_d , для каждого кадра определяются температуры опорных точек n и $n + 1$, таким образом, что $T_n < T_d < T_{n+1}$. Затем пересчитываются значения падающего потока излучения P_d по формуле:

$$P_d = P_n + (T_d - E_n) / (T_{n+1} - T_n) \times (P_{n+1} - P_n).$$

3. Для каждого кадра перед обработкой сигнала вычисляется коэффициент коррекции паразитных засветок по следующей формуле:

$$\Delta = (P_d - P_{\text{фона}}) \times t_{\text{интекущее}} / t_{\text{интэталон}},$$

где $P_{\text{фона}}$ — среднее значение падающего потока излучения значения фона, вычисляемый при текущей калибровке, $t_{\text{интекущее}}$ — текущее время экспозиции, а $t_{\text{интэталон}}$ — эталонное время экспонирования, при котором происходит подсчет среднего значения сигнала фона при калибровке.

4. Далее для каждого элемента ИК матрицы необходимо скорректировать аддитивный коэффициент по формуле:

$$FS'_{i,j,n} = FS_{i,j,n} + \Delta \times k_{i,j,n},$$

где $FS_{i,j,n}$ — значение сигнала пикселя ИК матрицы, полученное при текущей калибровке; $k_{i,j,n}$ — нормировочный коэффициент компенсации паразитных засветок, i — номер элемента по быстрому регистру считывания $i = 1..640$, j — номер элемента по мед-

ленному регистру считывания $j = 1..512$, $n = 0..1$ — показатель поля зрения (узкое или широкое).

Заключение

Предложенные в работе алгоритмы позволяют:

1. Предотвратить эффект перенасыщения пикселей ИК изображения при калибровке тепловизионной камеры. Данный алгоритм позволяет избежать на изображении фрагментов с постоянным контрастом, что приводит к потере информации и создает проблемы с корректной идентификацией объектов интереса, что недопустимо в боевых условиях.

2. Минимизировать влияние воздействия паразитного излучения (т.н. эффект Нарцисса) нагретых в процессе работы окружающих элементов оптической системы с использованием зеркал.

1. Соболев П.С., Черняк Б.В., Петров М.Н. Калибровка ИК матричного фотоприемного устройства методом трехточечной коррекции // Вестник НовГУ. 2018. №1(107). С.45-49
2. Ерофеев И.В. Автоколлимационная фокусировка оптико-электронных систем инфракрасного спектра // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т.56. №7. С.31-35.
3. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.

References

1. Sobolev P.S., Cherniak B.V., Petrov M.N. Kalibrovka IK matrichnogo fotopriemnogo ustroistva metodom trekhtochечноi korrektsii [Calibration of IR matrix photodetector by three-point correction]. Vestnik NovSU, 2018, no. 1(107), pp.45-49.
2. Erofeev I.V. Avtokollimatsionnaya fokusirovka optiko-elektronnykh sistem infrakrasnogo spektra [Autocollimation focusing of optical-electronic systems of infrared spectrum]. Izvestia Vuzov. Priborostroyeniye, 2013, v.56, no.7, p.31-35.
3. Yakushenkov Yu.G. Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov [Theory and calculation of optoelectronic devices]. Moscow, Logos Publ., 1999. 480 p.