

А. А. МАРАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, С. Н. ЯРЬШЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ ПРИ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЯХ В КАНАЛАХ ЦВЕТОВЫХ ВИДЕОКАМЕР

Предложены алгоритмы обработки спектрозональных изображений на едином матричном поле анализа с учетом перекрестных связей между элементами оптико-электронной системы предупреждения техногенных катастроф по пространственному положению элементов конструкции. Предложенный способ спектрозональных измерений координат активных реперных меток в поле зрения единого цветового матричного фотоприемника позволяет учитывать воздействие градиента температур воздушного тракта на процесс контроля оптико-электронной системы.

**Ключевые слова:** спектрозональный метод, оптико-электронная система, оценки координат изображений меток.

Для предупреждения техногенных катастроф возможно применять распределенные оптико-электронные системы (РОЭС) долговременного и оперативного контроля по пространственному положению элементов [1, 2], поскольку обследования технического состояния и экспертизы промышленной безопасности подавляющего большинства зданий и сооружений проводятся нерегулярно.

Использование РОЭС с многоэлементными фотоприемниками (МФП) имеет целый ряд преимуществ по сравнению с использованием остальных методов измерения координат. Погрешность таких измерителей достигает 0,05 от шага элемента фотоприемной многоэлементной структуры [3]. Помимо того, комплексирование информации по длине волны оптического излучения в многоканальных РОЭС с МФП [4] позволяет повысить эффективность работы систем такого класса.

В современных РОЭС существенное влияние на результат контроля оказывает среда распространения оптического излучения. Прежде всего, величина погрешности измерений зависит от таких явлений в атмосфере, как рефракция и турбулентность воздушного тракта. Рефракция вызывает систематическое отклонение направления распространения оптического излучения, в основном вследствие температурного градиента показателя преломления воздуха. Одним из способов уменьшения влияния рефракции является использование принципа спектрозональной селекции [5].

Целью настоящей работы является исследование возможности реализации спектрозонального метода при контроле пространственного положения активных реперных меток (РМ) РОЭС [1, 2] на МФП с учетом перекрестных связей между цветовыми фотоприемными матричными полями.

Наиболее доступным вариантом для реализации спектрозональной селекции является применение видеокамеры, каналы которой соответствуют трем основным цветам системы *RGB* [2]. В соответствии с шаблоном Байера три основных цвета формируют три спектрозональных канала *RGB*, информация с которых может быть снята с фотоприемника независимо друг от друга, так как каналы „обслуживаются“ независимыми группами пикселей. На рис. 1 представлены кривые (4—6) спектральной плотности  $S_\lambda$  фоточувствительности пикселей соответственно для *RGB* составляющих (КМОП матрицы OV561) и 1—3 — спектральных составляющих яркости характерного *RGB* ПИД. Кривая 6 (рис. 1) спектральной плотности фоточувствительности пикселей синей (*B*) области спектра пересекается с областью чувствительности красных (*R*) полупроводниковых излучающих диодов (ПИД), в то время как кривая 3

спектральной области излучательной способности синих (В) ПИД не пересекается с кривой 1 красных. При обработке изображений РМ, реализованных белыми ПИД в разных спектральных диапазонах, между каналами возникают перекрестные связи, которые обуславливают выбор специальных алгоритмов обработки этих изображений РМ.

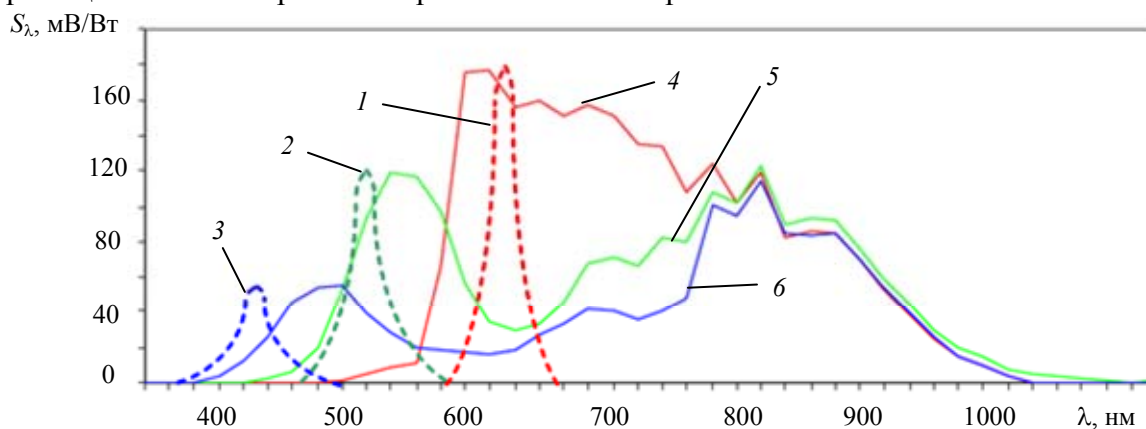


Рис. 1

На рис. 2 продемонстрировано пространственное расположение изображений синей 1 и красной 2 РМ на синих и красных матричных полях фоточувствительных элементов единой приемной матрицы при наличии вертикального градиента температуры в воздушном тракте: а — расположение синих полей, б — расположение красных полей. В соответствии с расположением элементов байеровского шаблона для матричного фотоприемника синие пиксели занимают нечетные номера элементов матричного поля и располагаются в нечетных строках (рис. 2, а); красные пиксели занимают четные номера элементов и располагаются в четных строках (рис. 2, б).

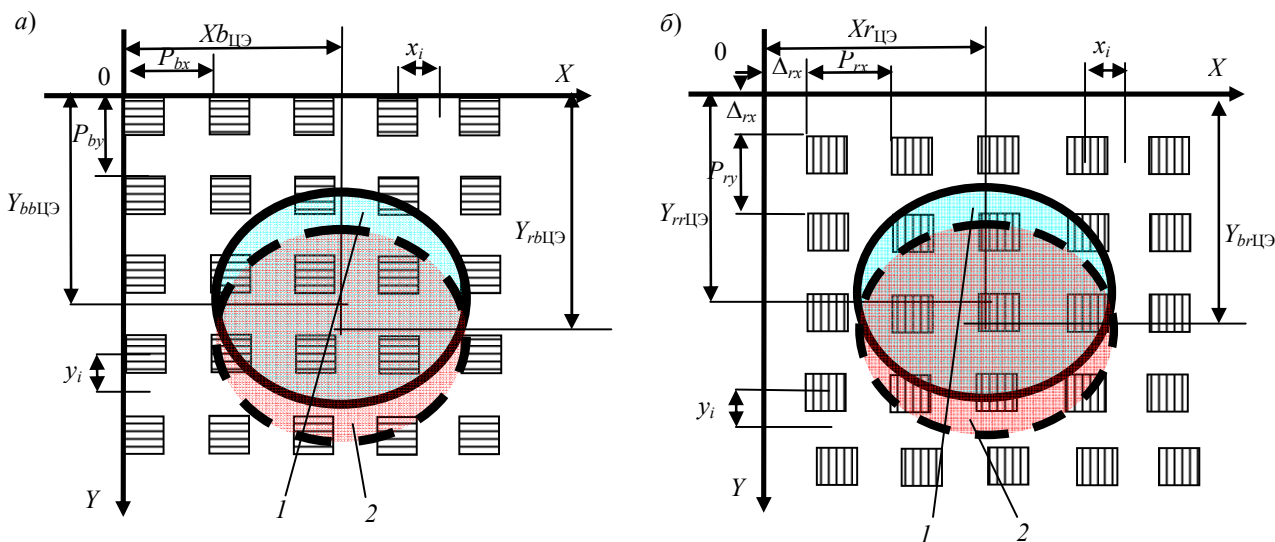


Рис. 2

Шаг синих элементов  $P_{bx}$  и  $P_{by}$  по координатам  $0X$  и  $0Y$  в два раза больше шага матричного поля  $x_i$  и  $y_i$  по соответствующим координатам.

Для адекватной оценки координат изображения малоразмерного объекта методом определения энергетического центра (ЭЦ) тяжести требуется, чтобы линейные размеры изображения РМ составляли не менее 4—5 размеров элемента (пиксела) [3]. В этом случае вычисление оценки координат центра синего (В) изображения РМ  $X_{bbЦЭ}$  и  $Y_{bbЦЭ}$  (рис. 2, а) для синей области спектра МФП можно производить по формулам:

$$X_{bb \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_i(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} Q_i(x_i)}; Y_{bb \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{j=N} \frac{\sum_{i=0}^{i=M} [Q_i(y_i) y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M} Q_i(y_i)}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_j$  — координаты элементов, входящих в окрестность  $M \times N$ ;  $M, N$  — величина окрестности, содержащей изображение  $PM$  (для квадратных областей  $M=N$ );  $Q_j(y_j)$  — суммарный сигнал с элементов, входящих в окрестность  $j$ -й строки;  $Q_i(x_i)$  — суммарный сигнал с элементов, входящих в окрестность  $M \times N, i$ -го столбца.

Для красного канала шаг элементов  $P_{rx}$  и  $P_{ry}$  (рис. 2, б), так же как и в синем канале, по координатам  $OX$  и  $OY$  будет в два раза больше шага матричного поля  $x_i$  и  $y_i$  по соответствующим координатам.

В этом случае вычисление оценки координат центра красного изображения  $PM$   $X_{rr \text{ ЦЭ}}$  и  $Y_{rr \text{ ЦЭ}}$  для используемой системы координат  $OXY$  в красной области спектра МФП можно производить по аналогичным формулам синего канала:

$$X_{rr \text{ ЦЭ}} = \Delta_{rx} + \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_i(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} Q_i(x_i)}; Y_{rr \text{ ЦЭ}} = \Delta_{ry} + \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{j=N} \frac{\sum_{i=0}^{i=M} [Q_i(y_i) y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M} Q_i(y_i)}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{rx}$  и  $\Delta_{ry}$  — горизонтальная и вертикальная поправки в красном канале видеокамеры.

При наличии градиента воздушного тракта для матричного поля синих элементов изображения синей и красной областей излучения  $PM$  будут смещены друг относительно друга (рис. 2, а). Для этого случая в алгоритме энергетического взвешивания изображений  $PM$  на синем матричном поле координаты общего энергетического центра  $X_{ob \text{ ЦЭ}}$  и  $Y_{ob \text{ ЦЭ}}$  будут определяться выражениями:

$$X_{ob \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) x_i + Q_{ir}(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) + Q_{ir}(x_i)]}; Y_{ob \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{i=N} \frac{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_i) y_i + Q_{jr}(y_j) y_j]}{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{jb}(y_j) + Q_{jr}(y_j)]}, \quad (3)$$

где  $X_{ob \text{ ЦЭ}}, Y_{ob \text{ ЦЭ}}$  — координаты общего энергетического центра изображений  $R$  и  $G$   $PM$  на синем поле;  $x_i, y_j$  — координаты элементов, входящих в окрестность  $M \times N$ ;  $Q_{jb}(x_i), Q_{jr}(x_i)$  — суммарный сигнал с элементов, входящих в окрестность  $M \times N, j$ -й строки синих и красных элементов матрицы.

В то же время в алгоритме энергетического взвешивания изображений  $PM$  на красном матричном поле координаты общего энергетического центра  $X_{or \text{ ЦЭ}}$  (рис. 2, б) и  $Y_{or \text{ ЦЭ}}$  будут определяться как

$$X_{or \text{ ЦЭ}} = \Delta_{rx} + \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) x_i + Q_{ir}(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) + Q_{ir}(x_i)]};$$

$$Y_{or\ \text{ЦЭ}} = \Delta_{ry} + \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{i=N} \frac{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_i) y_i + Q_{jr}(y_j) y_j]}{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_j) + Q_{jr}(y_j)]}, \quad (4)$$

где  $X_{or\ \text{ЦЭ}}$ ,  $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$  — координаты общего энергетического центра изображений  $R$  и  $B$  РМ на красном матричном поле.

Для определения величины вертикального градиента температуры воздушного тракта необходимо вычислить разность положений энергетических центров синего и красного изображения РМ:

$$\Delta Y_{rb} = Y_{bb\ \text{ЦЭ}} - Y_{rr\ \text{ЦЭ}}. \quad (5)$$

Величину  $\Delta Y_{rb}$  выражают через регистрируемые координаты  $Y_{ob\ \text{ЦЭ}}$  (3) изображения РМ на синем матричном поле и координаты  $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$  (4) изображения РМ на красном матричном поле с учетом коэффициентов перекрестной связи  $K_{rb}$  и  $K_{br}$  между синими и красными матричными полями.

Пусть уровни освещенности в изображениях синих и красных РМ отличаются в  $k_{br}$  раз, т.е.

$$k_{br} = Q_{bb\ i} / Q_{rr\ i},$$

где  $Q_{bb\ i}$  — значение освещенности в  $i$ -м элементе изображения синей РМ;  $Q_{rr\ i}$  — максимальное значение освещенности в  $i$ -м элементе изображения красной РМ. Тогда зависимость координаты положения энергетического центра  $Y_{b\ \text{ЦЭ}}$  от регистрируемых координат положения энергетических центров  $Y_{ob\ \text{ЦЭ}}$  и  $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$  для синего изображения РМ в синем канале видеокамеры с учетом коэффициентов влияния перекрестных связей  $K_{rb}$ ,  $K_{br}$  и  $k_{br}$  будет

$$Y_{b\ \text{ЦЭ}} = [Y_{ob\ \text{ЦЭ}}(K_{rb}/k_{br} + 1) - Y_{or\ \text{ЦЭ}} K_{rb}(K_{br} + 1)] / (1 - K_{rb} K_{br}), \quad (6)$$

а зависимость координаты положения энергетического центра  $Y_{r\ \text{ЦЭ}}$  от регистрируемых координат положения энергетических центров  $Y_{ob\ \text{ЦЭ}}$  и  $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$  для красного изображения РМ в красном канале видеокамеры будет:

$$Y_{r\ \text{ЦЭ}} = [Y_{or\ \text{ЦЭ}}(1 + k_{br} K_{br}) - Y_{ob\ \text{ЦЭ}} K_{br}(k_{br} + K_{rb})] / (1 - K_{br} K_{rb}). \quad (7)$$

Тогда с учетом выражений (6) и (7) спектральная разность  $\Delta Y_{rb}$  будет:

$$\Delta Y_{rb} = (Y_{or\ \text{ЦЭ}}[(1 + k_{br} K_{br}) + K_{rb}(K_{br} + 1)] - Y_{ob\ \text{ЦЭ}}[K_{br}(k_{br} + K_{rb}) + (K_{rb}/k_{br} + 1)]) / (1 - K_{rb} K_{br}). \quad (8)$$

Из выражения (8) нетрудно увидеть, что систематическая составляющая относительной погрешности регистрации спектральной разности в случае перекрестных связей сильно зависит от величины  $K_{rb}$ ,  $K_{br}$  и  $k_{br}$ , поэтому при обработке результатов измерений спектральной разности  $\Delta Y_{rb}$  необходимо учитывать влияние коэффициентов перекрестных связей в соответствии с выражением (8).

Чтобы оценить возможность реализации спектрального метода с учетом перекрестных связей, экспериментально исследовалось влияние градиента температуры воздушного тракта на функционирование физической модели РОЭС с белыми ПИД.

В такой модели РОЭС излучение от белого ПИД проходит через объектив и попадает на цветовой МФП камеры. Разрешение передаваемого видеосигнала, контрастность или способ получения видеoinформации устанавливаются при помощи персонального компьютера, к которому подключена камера. В физической модели РОЭС использовалась камера VEC-545 (матрица КМОП OV5620 формата 1/2,5", размер пиксела 2,2×2,2 мкм, объектив Юпитер-21М,  $f' = 200$  мм, расстояние до источника 2,73 м). В качестве РМ использован белый ПИД AL-513RGB, создающий оптическое излучение в трех спектральных диапазонах ( $\lambda_{\max} = 470, 525$  и 625 нм). Обработка и управление моделью РОЭС осуществлялись с помощью специальной компьютерной программы, разработанной в среде LabView, только для двух длин волн  $B$  и  $R$  (соответственно 470 и 625 нм).

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости координат  $Y_{орЦЭ}$  и  $Y_{обЦЭ}$  изображений РМ от времени наблюдения (нарастание температуры воздушного тракта) в синем (1) и красном (2) каналах видеокамеры с учетом корректировок перекрестных связей в синем (3) и красном (4) каналах. Как видно из хода кривых 1 и 2, при воздействии температуры на воздушный тракт наблюдается ожидаемое смещение координат центров изображений РМ. При этом координаты  $Y_{орЦЭ}$  и  $Y_{обЦЭ}$  удаляются друг от друга, что указывает на увеличение спектральной разности  $\Delta Y_{rb}$ . Рост оценки СКО координат  $Y_{орЦЭ}$  и  $Y_{обЦЭ}$  прекращается через час, что характеризует наступление стационарного режима. За это время под воздействием температуры координаты изображений РМ  $Y_{орЦЭ}$  и  $Y_{обЦЭ}$  сместились соответственно на 22,62 и 20,73 пкс, при этом максимальное СКО не превысило 0,5 пкс. Максимальная спектральная разность между измерениями ЦЭ в каналах составила  $\Delta Y_{rb} = 0,14$  пкс по вертикали и  $\Delta X_{rb} = 0,04$  пкс по горизонтали, что соответствует градиенту температуры воздушного тракта.

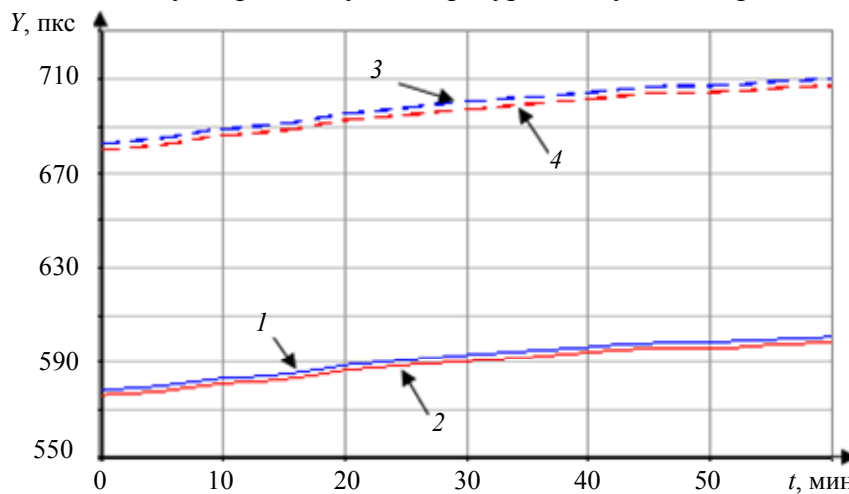


Рис. 3

С учетом коэффициента коррекции влияния перекрестных связей для значений  $K_{br} = 0,165$ ,  $K_{rb} = 0,013$  разность между смещениями центров в каналах составляет  $\Delta Y_{rb} = 0,039$  пкс по вертикали и  $\Delta X_{rb} = 0,011$  пкс по горизонтали.

В результате описанных исследований

— предложены алгоритмы пересчета оценки координат изображений активных РМ при спектральной селекции на едином матричном поле анализа цветового МФП;

— доказана возможность синхронно обеспечивать СКО результата измерения положения изображения РМ не более 0,5 пикселя в двух спектральных диапазонах, используя выпускаемые серийно видеокамеры ВЕС-545.

— доказано, что предложенный способ спектральной селекции координат активных РМ в поле зрения единого цветового МФП позволяет регистрировать воздействие градиента температур воздушного тракта на процесс контроля РОЭС.

Работа проведена в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатинский Е. М., Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (67). С. 130.
2. Лапшинов О. Ю., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Исследование возможности применения спектральной селекции для ослабления влияния воздушного тракта в оптико-электронных системах контроля положения // Там же. 2011. № 3 (73). С. 5—9.

3. Соломатин В. А., Якушенков Ю. Г. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1986. № 9. С. 62—69.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга; Логос, 2007. 192 с.
5. Latyev S. M., Pankov E. D., Prokofjev A. V., Tymofeev A. N. Refraction's slacking in optoelectronic systems for positioning of elements of ecological dangerous objects // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5381. P. 157—163.

**Сведения об авторах**

- Антон Андреевич Мараев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: antoshka87@gmail.com
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Сергей Николаевич Ярышев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: ysn63@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию  
25.11.11 г.