



**ТРЕХКАНАЛЬНАЯ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ,
ФОРМИРУЕМЫХ МАТРИЧНЫМ
ФОТОПРИЕМНИКОМ**

Косых В.П., Громилин Г.И., Яковенко Н.С

Новосибирск



Введение

Одной из частных особенностей задачи обнаружения и трассирования малоразмерных подвижных объектов в последовательности изображений, формируемых матричными фотоприемниками (МФП), является изменение формы и яркости сигналов от объектов [1,3], обусловленное их движением относительно решетки фоточувствительных элементов (ФЧЭ) приемника.

Малоразмерные объекты (МО) – объекты, изображения которых покрывают всего несколько соседних ФЧЭ, а распределение освещенности в них задает в основном функция рассеяния точки (ФРТ) оптической системы, формирующей эти изображения.

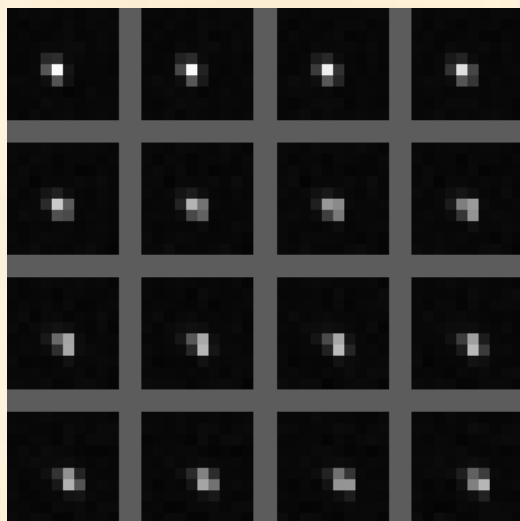
Форма и амплитуда регистрируемых сигналов от МО зависят от положения их изображений относительно ФЧЭ, порождая пространственную неоднородность аппаратной функции приемника. Это осложняет выполнение согласованной фильтрации, обычно предшествующей процедурам обнаружения объектов, а также их трассирования и распознавания по яркостному поведению.

1. Гридин А.С., Дмитриев И.Ю., Васильев В.Н. Труды VII международной конференции «Прикладная оптика-2006», СПб, ГИТМО(ТУ), 2007, т.1. с.139-144
2. V. Samson, F. Champagnat, and J.-F. Giovannelli. Point target detection and subpixel position estimation in optical imagery // *App. Opt.*, Vol. 43, № 2, 2004, pp. 257-263
3. Меденников П.А. Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86, № 8. С. 65-69

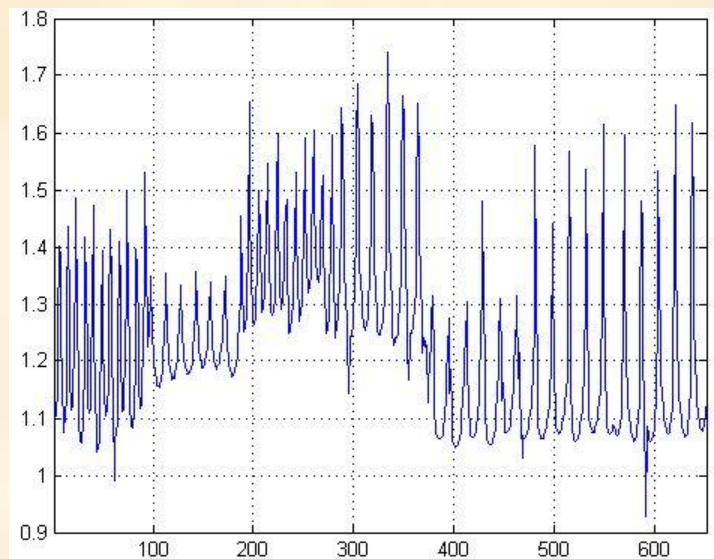


Введение

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ И АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА ПРИ ДВИЖЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ОБЪЕКТА ПОСТОЯННОЙ ЯРКОСТИ



в пределах соседних ФЧЭ



через несколько ФЧЭ
в разных направлениях

Частичному выравниванию амплитуды и формы сигнала служат:

- микросканирование в «смотрящих» устройствах,
- многорядная топология ФЧЭ в сканирующих устройствах,
- учитывающая изменение положения фильтрация сигнала на этапе предварительной обработки.



Цель работы

В работе [2] теоретически рассмотрены соответствующие различным критериям оптимальности методы согласованной линейной фильтрации при условии равновероятного расположения изображений объектов относительно центров ФЧЭ. В ней же экспериментально показано, что линейный фильтр, построенный как собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу сингулярного разложения множества таких изображений, по обнаружительной способности практически не уступает оптимальному, минимизирующему байесовскую ошибку решения.

Целью представленной работы является исследование возможности выравнивать амплитуду сигнала и оценивать координаты положения объекта с ошибкой, меньшей, чем шаг дискретизации, с помощью трехканального фильтра, компонентами которого являются собственные векторы, соответствующие трем наибольшим собственным числам того же сингулярного разложения.



Сингулярное разложение множества изображений объектов

Имеется $k = \overline{1, K}$ дискретных изображений объектов, по-разному смещенных относительно центров ФЧЭ.

Условный центр (например, максимум) k -го непрерывного изображения объекта проецируется в некоторый пиксель дискретного изображения со смещением $\mathbf{d}_k = (x_k, y_k), |x_k|, |y_k| \leq 0.5$ относительно его центра. Лексикографически упорядоченную (например, по строкам) окрестность этого пикселя \mathbf{o}_{dk} можно представить в виде векторной модели

$$\mathbf{o}_{dk} = \sum_i a_{idk} \boldsymbol{\varphi}_i, \quad i = \overline{1, K}, \quad (1)$$

где набор коэффициентов a_{idk} зависит от вектора смещения \mathbf{d}_k , базисными векторами $\boldsymbol{\varphi}_i$ служат собственные векторы (СВ) матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$, а матрица \mathbf{O}^T строится из векторов \mathbf{o}_{dk} : $\mathbf{O}^T = [\cdots \mathbf{o}_{dk} \cdots]$.

Набор \mathbf{o}_{dk} либо рассчитывается посредством моделирования ФРТ и распределения чувствительности по площадке ФЧЭ, либо получается экспериментально при стендовых измерениях характеристик конкретного прибора.

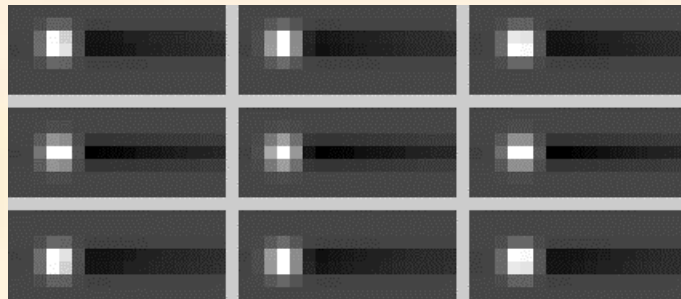


Сингулярное разложение множества изображений объектов

Посредством моделирования процесса формирования сигнала в оптико-электронном тракте сканирующего устройства с многорядным фотоприемником [4] построено 225 (15×15) изображений объектов, размещенных эквидистантно по обеим координатам в пределах пикселя.

По изображениям построены векторы \mathbf{O}_{dk} , матрица $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$, вычислены базисные векторы $\boldsymbol{\varphi}_i$ и соответствующие им собственные числа λ_i .

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
3.718	0.266	0.265	0.019	0.010	0.007	0.001



Изображения объектов,
проецируемых в центр пикселя и
между пикселями



3 старших собственных вектора $\boldsymbol{\varphi}_i$
матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$,
свернутые в двумерные массивы \mathbf{f}_i



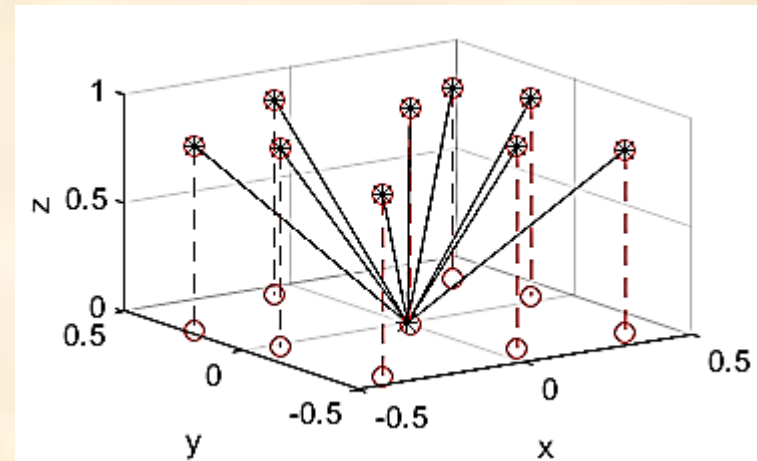
Трехканальная фильтрация

Линейная фильтрация изображения, содержащего объекты, фильтрами, соответствующими этим трем компонентам, дает трехкомпонентное изображение, каждый пиксель которого можно рассматривать как трехмерный вектор

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3) = (\boldsymbol{\varphi}_1^T \mathbf{e}, \boldsymbol{\varphi}_2^T \mathbf{e}, \boldsymbol{\varphi}_3^T \mathbf{e}),$$

где \mathbf{e} – вектор, содержащий лексикографически упорядоченную окрестность пикселя. Длина вектора \mathbf{v} , соответствующего окрестности, содержащей объект, зависит от яркости объекта, а ориентация – от его смещения относительно центра пикселя.

На рисунке показаны векторы, полученные трехканальной фильтрацией изображений, приведенных на слайде 6, и проекции их вершин на плоскость XY.



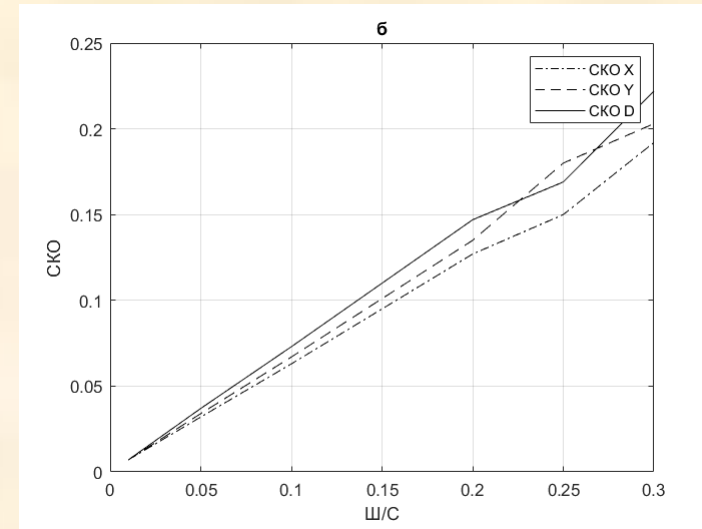
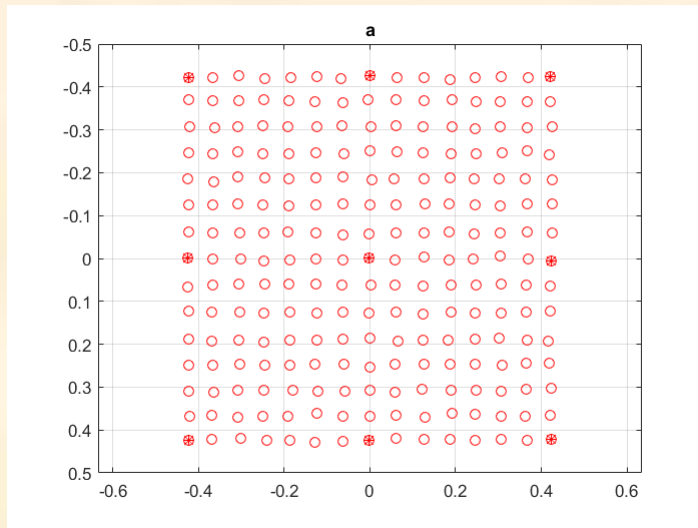


Трехканальная фильтрация: оценка смещений

Мерой смещения объекта от центра пикселя служат величины, представленные полиномами 2 степени от отношений v_2/v_1 и v_3/v_1 компонент вектора \mathbf{v} :

$$\Delta x = (a_1 v_2^2 + a_2 v_3^2 + a_3 v_2 v_3)/v_1^2 + (a_4 v_2 + a_5 v_3)/v_1 + a_6,$$
$$\Delta y = (b_1 v_2^2 + b_2 v_3^2 + b_3 v_2 v_3)/v_1^2 + (b_4 v_2 + b_5 v_3)/v_1 + b_6.$$

Коэффициенты a_i и b_i зависят от конкретной реализации оптической системы, топологии ФЧЭ и характеристик электронного тракта приемника и определяются посредством калибровки.



Слева – значения оценок Δx и Δy для всех 225 объектов, справа – зависимость СКО Δx , Δy и $\Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ от отношения «шум/сигнал».

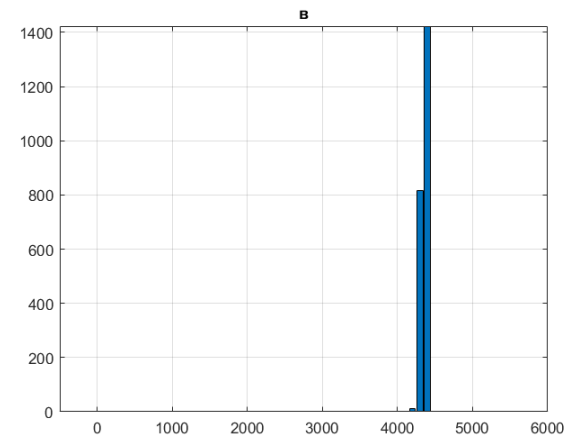
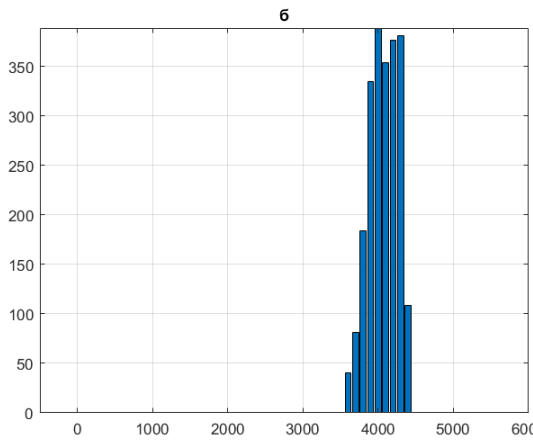
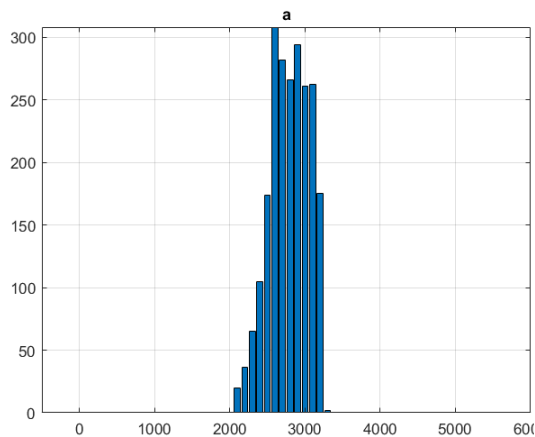


Трехканальная фильтрация: выравнивание амплитуд

В силу ортонормальности фильтров в качестве оценки амплитуды сигнала в данной точке естественно принять длину трехмерного вектора \mathbf{v} :

$$v = |\mathbf{v}|. \quad (2)$$

Если шум в исходном изображении не слишком велик, и разброс амплитуд сигнала определяется в основном положением изображения объекта относительно центра ФЧЭ, применение 3D фильтрации позволяет существенно снизить зависимость амплитуды от положения.



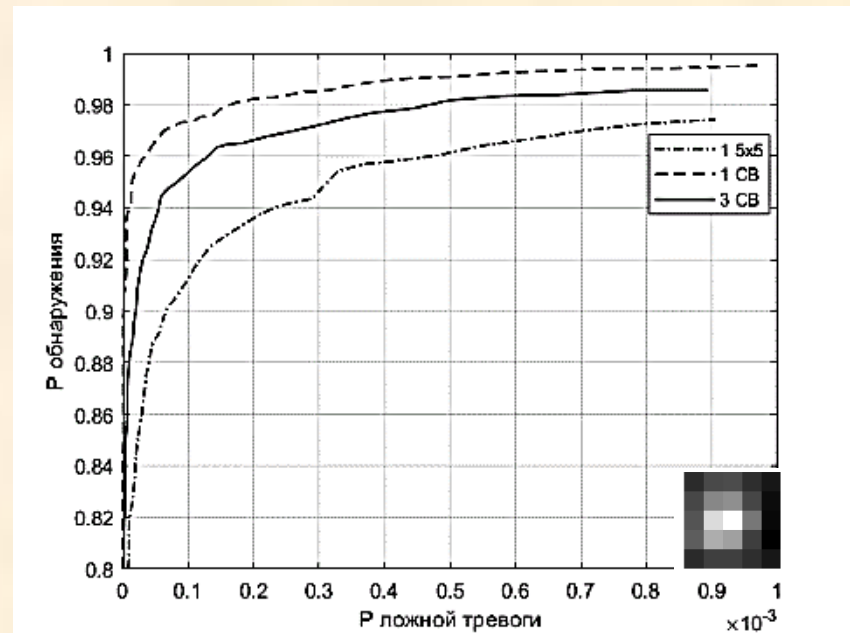
Гистограммы амплитуд сигнала: слева – в исходных изображениях объектов, в середине – после применения фильтра f_1 , справа – гистограмма v . В исходных изображениях отношение СКО шума/СКО амплитуд равно 0.1



Трехканальная фильтрация: надежность обнаружения

Здесь представлены рабочие характеристики[↓] (зависимость вероятности обнаружения от вероятности ложной тревоги) порогового обнаружителя при достаточно высоком уровне шума (отношение Ш/С = 30%) для 3 типов фильтров: одноканального f_1 (обозначен «1 СВ»), трехканального («3 СВ»), формирующего выходное изображение согласно выражению (2), и одноканального («1 5×5»), построенного усреднением множества усеченных окрестностей объекта (внизу справа). Последний фильтр представляет интерес из-за простоты построения и малых размеров. Первый фильтр на изображениях с высоким уровнем шума обеспечивает вероятность пропуска $P_{\text{проп}} = 1 - P_{\text{обн}}$ объекта более низкую (2.7%), чем второй (4.7%) и третий (8.7%), при вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}} = 10^{-4}$. Поэтому трехканальный фильтр целесообразно применять для уточнения координат и выравнивания амплитуд объектов при низких (<10%) уровнях шума.

[↓] Характеристики построены более чем по 1700 изображений объектов.





Заключение

1. Разработан способ расчета трехканального линейного фильтра, учитывающий изменение формы и амплитуды изображений малоразмерных объектов, формируемых матричным фотоприемником при движении объектов относительно решетки фоточувствительных элементов.
2. Результаты применения фильтра к обнаружению подвижных слабоконтрастных объектов на зашумленных изображениях, подтверждают возможность оценивания координат объектов с субпиксельной точностью и способность выравнивания их амплитуд при сравнительно низком ($<10\%$) уровне шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 121022000116–0)

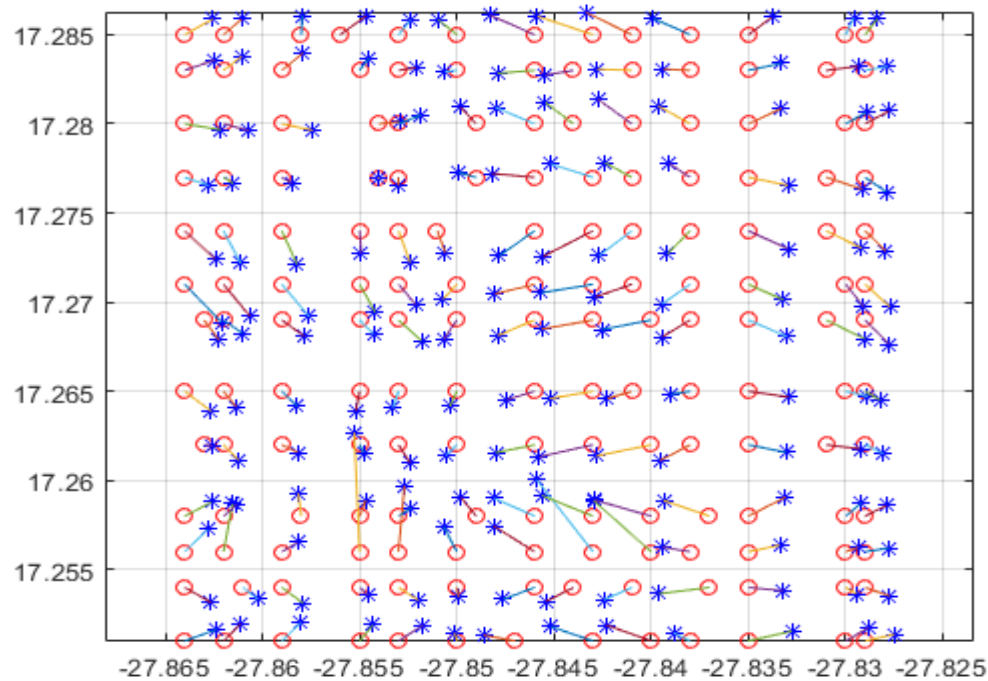


СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



Дополнительно

При стендовых испытаниях сканирующего многорядного ФПУ получены 169 (13×13) изображений малоразмерного объекта, покрывающих почти эквидистантно (с шагом ~ 3 мкм) площадку размером $\sim 35 \times 35$ мкм, т.е. чуть больше, чем 2×2 пикселя. Изложенным выше способом получены оценки координат объектов. На рисунке представлены результаты оценивания при отношении СКО шума/СКО амплитуд ~ 0.06 .



Красным показано положение объектов по координатным датчикам стенда, синим – оценки. Смещения оценок: по горизонтали $-3 \div 2$ мкм, по вертикали $-2 \div 7$ мкм. СКО смещений: по горизонтали ~ 1 мкм, по вертикали ~ 1 мкм.