

УДК 004.932.2

АППРОКСИМАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА, ФОРМИРУЕМОГО СКЕНИРУЮЩИМ МНОГОРЯДНЫМ ФОТОПРИЁМНИКОМ

© В. В. Абилов¹, Г. И. Громилин², В. П. Косых², В. А. Стрельцов¹,
Н. С. Яковенко²

¹ ГНЦ РФ АО «Научно-производственное объединение «Орион»»,
111538, Москва, ул. Косинская, 9

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kosych@iae.nsk.su

Исследуется возможность повышения точности измерения координат и яркости малоразмерных подвижных объектов в последовательности изображений, формируемых сканирующим многорядным фотоприёмником. Повышение точности достигается за счёт аппроксимации изображения объекта функцией, параметрами которой являются яркость объекта и смещение центра его проекции относительно решётки фоточувствительных ячеек (ФЧЯ) приёмника. Критериями качества аппроксимации выступают, с одной стороны, среднеквадратичная разность между изображением объекта и аппроксимирующей функцией, с другой — разброс оценок его координат и яркости в зависимости от положения относительно центра ячейки фотоприёмника в серии изображений. На сериях изображений, полученных посредством проецирования освещённой диафрагмы малого диаметра в плоскость фоточувствительного слоя приёмника, сравниваются несколько наиболее распространённых функций, обычно применяемых для аппроксимации дискретных изображений малоразмерных объектов. Показано, что даже при достаточно высоком уровне случайного шума применение аппроксимирующей модели позволяет оценить координаты объекта со среднеквадратичной ошибкой, не превышающей 20 % от шага решётки ФЧЯ.

Ключевые слова: многорядный фотоприёмник, малоразмерный подвижный объект, дробные координаты, выравнивание яркости.

DOI: 10.15372/AUT20240505
EDN: PVXUDS

Введение. Одной из частных особенностей задачи обнаружения и трассирования малоразмерных подвижных объектов в последовательности изображений, формируемых матричными фотоприёмниками (МФП), является изменение формы и яркости сигналов от объектов [1, 2], обусловленное их движением относительно решётки фотоприёмных ячеек (ФПЯ) матрицы. Малоразмерными здесь считаются объекты, изображения которых в плоскости фотоприёмника покрывают площадь всего в несколько соседних ФПЯ, а распределение освещённости в них задаёт в основном функция рассеяния точки (ФРТ) оптической системы, формирующей эти изображения. Форма и амплитуда регистрируемых сигналов от таких объектов зависят от положения их изображений относительно ячеек матрицы, порождая пространственную неоднородность аппаратной функции приёмника. Это осложняет обнаружение объектов, их трассирование и распознавание по яркостному поведению. Частичному выравниванию амплитуды и формы сигнала служат микросканирование [3] и применение специальной многорядной топологии размещения ФПЯ [4], хотя и в этих случаях полного выравнивания достичь не удастся [4]. Различные методы предобработки таких изображений, позволяющие повысить надёжность обнаружения объектов и определять их координаты с субпиксельной точностью, предложены в работах [2, 5–7]. В [2]

рассмотрены соответствующие различным критериям оптимальности методы согласованной линейной фильтрации при условии равновероятного расположения изображений объектов относительно центров ФПЯ. В [5–7] вводятся различные модели ФРТ, позволяющие оценить координаты и восстановить амплитуду объекта, проекция которого находится не в центре ячейки. По различным причинам одной из наиболее широко распространённых аппроксимаций ФРТ оптической системы является двумерная функция Гаусса [6, 8]. Если геометрический размер изображения диафрагмы в плоскости фотоприёмника и размер ФЧЯ сопоставимы с длиной волны излучения объекта, ФРТ можно аппроксимировать функцией, описывающей дифракцию Фраунгофера на круглом отверстии [9, с. 431]. При астрономических измерениях координат звёзд матричным приёмником в работе [7] для аппроксимации ФРТ предлагается использовать обобщённую функцию распределения ошибок [10] с показателем степени 1,5.

Постановка задачи. Данная работа посвящена исследованию моделей, позволяющих аппроксимировать сигнал многорядного сканирующего фотоприёмника, возникающий при проецировании на него изображения освещённой диафрагмы малого диаметра. Различные аппроксимирующие модели сравниваются с точки зрения определения координат объекта точнее шага ячеек фотоприёмника и выравнивания амплитуды сигнала при изменении положения объекта относительно центра ФПЯ. Экспериментальный материал получен при испытаниях сканирующего многорядного фотоприёмного устройства [11] на измерительном стенде, позволяющем проецировать изображение диафрагмы, равномерно освещаемой моделью абсолютно чёрного тела (АЧТ), в плоскость ФПЯ, контролируемо изменяя положение проекции относительно их центров.

В качестве моделей сигнала проверялись функция Гаусса (далее — Gauss)

$$f_1(x, y) = A \exp(-r^2), \quad r = \sqrt{\frac{(x - x_c)^2}{2s_x^2} + \frac{(y - y_c)^2}{2s_y^2}},$$

аналог функции, описывающей дифракцию Фраунгофера на круглом отверстии, но допускающий отсутствие центральной симметрии (Besselh, поскольку в основе модели лежит $J_1(r)$ — функция Бесселя первого рода)

$$f_2(x, y) = A \left[\frac{2J_1(r)}{r} \right]^2,$$

квадрат кардиального синуса (Sinc)

$$f_3(x, y) = A \left[\frac{\sin(x - x_c)}{s_x} \right]^2 \left[\frac{\sin(y - y_c)}{s_y} \right]^2$$

и обобщённая функция распределения ошибки (General Error Distribution Function — GEDF) [10]

$$f_4(x, y) = A \exp(-\rho^p), \quad \rho = \sqrt{\frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{2s^2}}.$$

Поскольку в исследуемом фотоприёмнике для подавления дрейфа темнового сигнала на входе каждой ячейки стоит фильтр высоких частот, в модель введено дифференцирующее звено первого порядка, работающее вдоль направления сканирования. Дробные координаты и значение максимума моделирующей функции, её ширина вдоль и поперёк направления сканирования и постоянная времени дифференцирующего фильтра оценивались с помощью функции оптимизации *fminsearch()* из пакета MATLAB. Для функции обобщённой ошибки оценивался оптимальный показатель степени.

Экспериментальный материал содержал две серии кадров: 1) с изображением диафрагмы в центре выбранной ФПЯ при разных освещённостях (освещённость регулируется

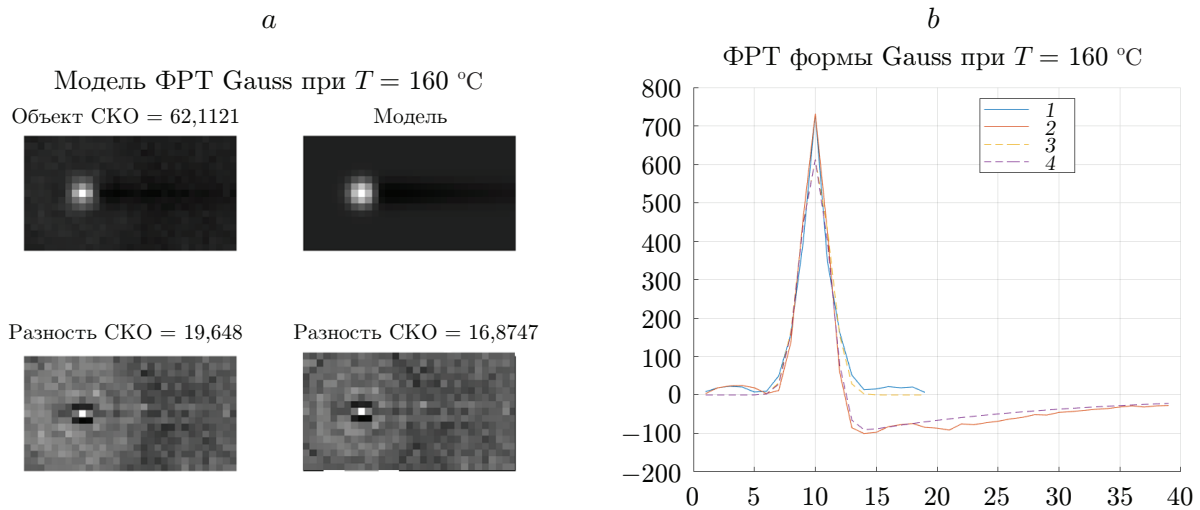


Рис. 1. Реальное и модельное изображения (a) и их профили (b): 1 — поперёк скана, 2 — вдоль скана, 3 — модель поперёк, 4 — модель вдоль

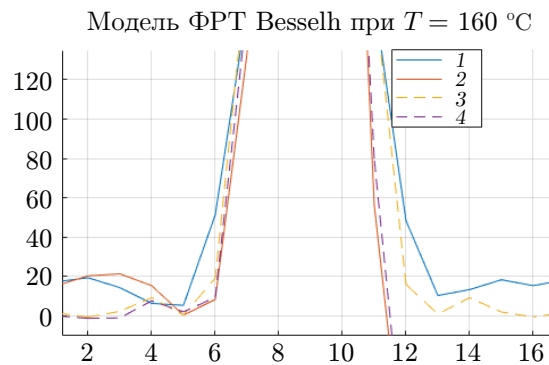


Рис. 2. Профили изображения диафрагмы и аппроксимирующей его дифракционной модели: 1 — поперёк скана, 2 — вдоль скана, 3 — модель поперёк, 4 — модель вдоль

температурой полости АЧТ) и 2) с изображением, смещающимся в пределах размеров одной ФПЯ при фиксированной температуре АЧТ. Исходные данные в кадрах представлены в виде положительных целых чисел в диапазоне $[0, 2^{14}-1]$. Перед последующим анализом значения данных в кадрах центрировались относительно среднего уровня вдоль направления сканирования.

Вид сигнала. На рис. 1, a представлены сформированное фотоприёмником изображение диафрагмы, спроецированной в центр ФЧЯ (вверху слева), изображение «привязанной» к нему модели Gauss (вверху справа) и разность между реальным и модельным изображениями (внизу слева), а на рис. 1, b — профили (сечения) реального и модельного изображений, проходящие через максимум сигнала вдоль и поперёк направления сканирования.

На рис. 1 видно, что положение максимума модели и сигнала совпадают, но амплитуды сильно различаются. Выброс ниже нуля в профиле вдоль направления сканирования обусловлен действием дифференцирующего фильтра с большим значением постоянной времени. Кроме того, вокруг максимума сигнала видно широкое кольцо. Предположение, что это первое дифракционное кольцо, опровергается рис. 2, на котором сопоставлены про-

Т а б л и ц а 1
Зависимость яркости кольца от температуры АЧТ

Температура АЧТ, °С	120	160	180	250	290
Амплитуда центра	183	612	1027	4711	8346
Амплитуда кольца	23,16	26,65	23,16	21,69	21,85

Т а б л и ц а 2
Остаточная разность различных моделей

Модель	Представление библиотечными функциями MATLAB	ОР
Sinc	$A \cdot (\text{sinc}((x - x_0)/s_x))^2 \cdot (\text{sinc}((y - y_0)/s_y))^2$	85,82
Besselh	$A \cdot (2 \cdot \text{besselj}(1, r)/r)^2, r = \text{sqrt}(((x - x_0)/s_x)^2 + ((y - y_0)/s_y)^2)$	87,69
Gauss	$A \cdot \text{gaussmf}(x, [x_0, s_x]) \cdot \text{gaussmf}(y, [y_0, s_y])$	70,53
GEDF	$A \cdot \exp(-(r/s)^p/2), r = \text{sqrt}((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)$	46,02
GEDF 1,5	То же, что и GEDF, с показателем $p = 1,5$	47,10

фили реального сигнала и его аппроксимации моделью Besselh. На рисунке видно, что дифракционное кольцо расположено значительно ближе к центру сигнала и имеет меньшую амплитуду.

На левой части рис. 2, где отсутствует отрицательный выброс, оценена амплитуда кольца при разных температурах АЧТ.

Из данных в табл. 1 следует, что амплитуда кольца практически не меняется при значительном изменении яркости источника и амплитуды сигнала. По-видимому, кольцо создаётся паразитной засветкой. На рис. 1, а внизу справа показана разность реального и модельного изображений после оценки и компенсации кольца.

Моделирование формы сигнала. Подбор модели выполнен на изображениях диафрагмы размером 17×31 , полученных на линейном участке светосигнальной характеристики фотоприёмного устройства. В качестве параметров модели оценивались дробные координаты и значение максимума функции, её ширина вдоль и поперёк сканирования и постоянная времени дифференцирующего фильтра. Для функции обобщённой ошибки оценивался оптимальный показатель степени. Оптимизируемой целевой функцией служила остаточная разность (ОР) — среднеквадратичное отклонение (СКО) модели от реального изображения диафрагмы. Качество модели характеризуется отношением остаточной разности к СКО изображения.

В табл. 2 приведены значения остаточной разности с разными моделями сигнала при значении СКО изображения 438,12.

Приведённые в табл. 2 формулы используют библиотечные функции MATLAB: sinc — кардиальный синус; gaussmf — функция Гаусса; besselj — функция Бесселя первого рода первого порядка; sqrt — корень квадратный; exp — экспонента. Оцениваемые параметры моделей: x_0, y_0 — координаты максимума; s_x, s_y, s — характерная ширина модели.

Профили вдоль и поперёк направления сканирования реального сигнала и различных моделей представлены на рис. 3. Лучше всего сигнал аппроксимируется обобщённой функцией ошибки с показателем степени $p = 1,41$, профили которой представлены на рис. 3, d.

Зависимость параметров модели от смещения относительно центра ячейки. Вторая серия кадров содержит изображения диафрагмы, смещаемой относительно центров фоточувствительных ячеек, полученные при постоянной температуре АЧТ с включённым (режим AC) и отключённым (режим DC) дифференцирующим фильтром на входе ФЧЯ. Изменения положения диафрагмы относительно решётки ФЧЯ фиксировались датчиком

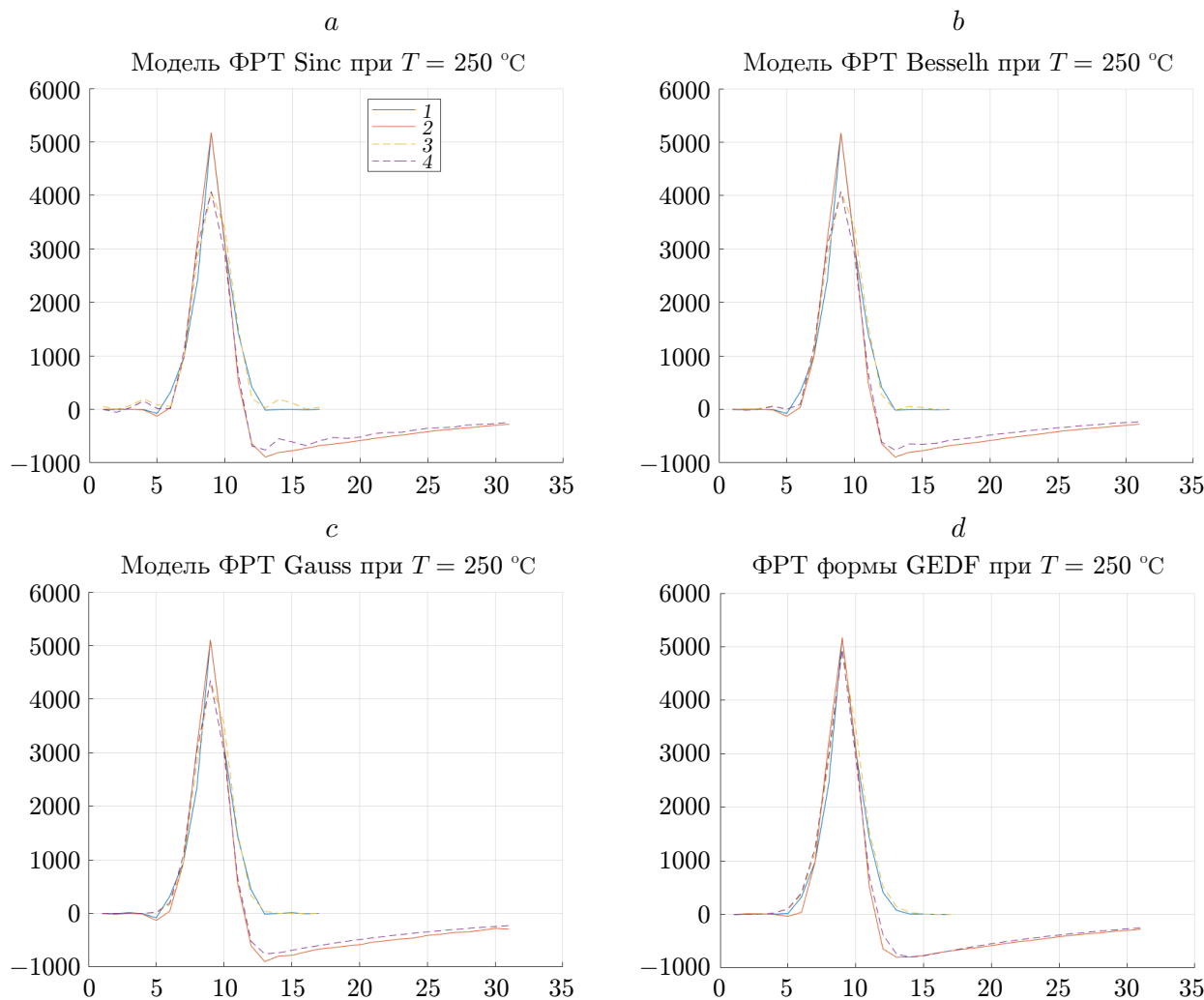


Рис. 3. Профили реального изображения и различных моделей: 1 — поперёк скана, 2 — вдоль скана, 3 — модель поперёк, 4 — модель вдоль

положения подвижного стола, на котором установлен фотоприёмник. Координаты и последовательность точек съёмки кадров (в миллиметрах) по данным датчика показаны на рис. 4 для обоих режимов (по горизонтали — вдоль, по вертикали — поперёк направления сканирования). Большой звёздочкой помечено положение начала съёмки.

Оценка параметров моделей проводилась по изображениям диафрагмы, полученным десятикратным усреднением кадров в каждом положении стола. На рис. 5 приведены оценённые с помощью модели Gauss координаты диафрагмы (в пикселях, определяемых решёткой ФЧЯ) для режимов АС (a) и DC (b). Траектории диафрагмы, оценённые по параметрам модели, выглядят уже не столь идеально, как траектории, построенные по данным датчика положения. Однако, судя по тому, что эти траектории повторялись с очень небольшими вариациями для всех моделей за исключением Sinc, оценки которой группируются вблизи центров ФЧЯ, неидеальность обусловлена совокупностью погрешностей системы управления столом и датчика.

В связи с этим «истинное» положение диафрагмы считалось усреднением по всем используемым в эксперименте моделям, кроме Sinc, а в качестве оценки ошибки принималось максимальное по моделям отклонение от усреднённого положения. При применении

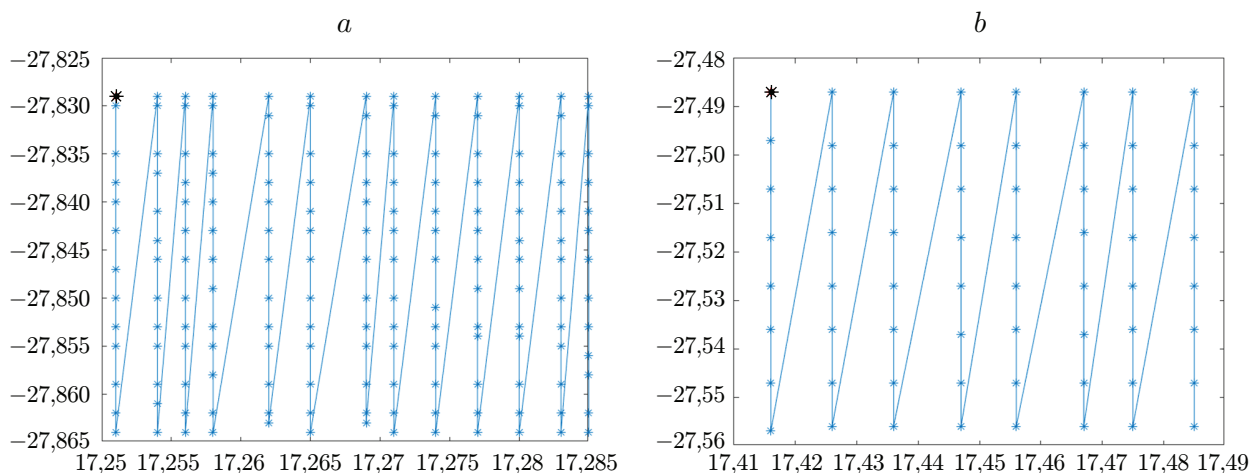


Рис. 4. Траектория перемещения стола в режимах АС (а) и DC (b)

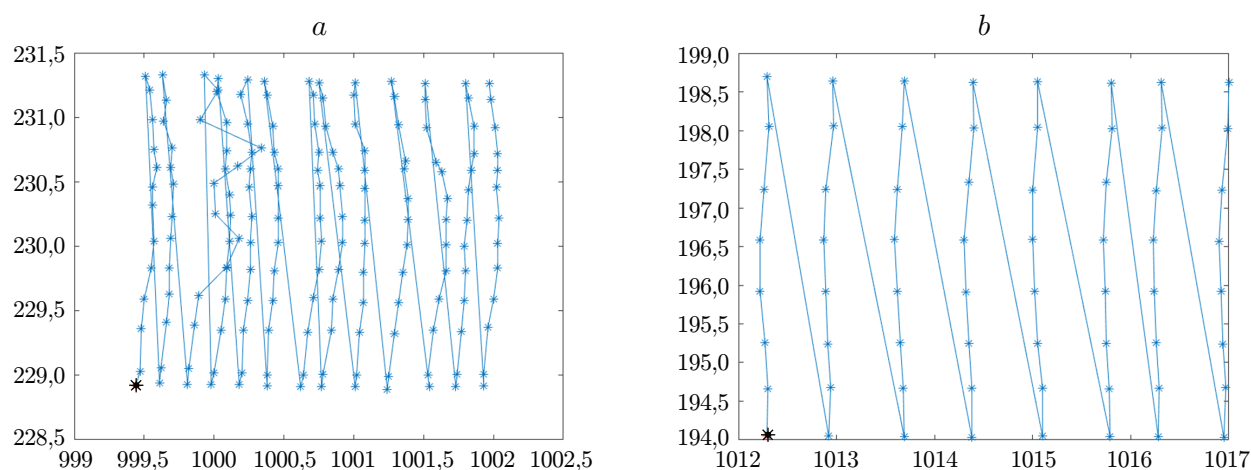


Рис. 5. Траектории, полученные аппроксимацией функцией Гаусса в режимах АС (а) и DC (b)

функций Gauss, Besselh, GEDF с оцениваемым показателем степени p и GEDF с фиксированным $p = 1,5$ максимальное отклонение от среднего не превышало 0,06 пикселя во всех положениях точек съёмки.

Влияние шумов на точность определения координат проверялось на тех же сериях кадров добавлением к изображениям случайного нормального шума с СКО 40 и 200 при средней амплитуде локальных максимумов в них порядка 2000. Среднеквадратичное отклонение оценок координат для разных моделей приведено в табл. 3.

Пеленгационная характеристика. При смещении центра проекции диафрагмы к краям ФЧЯ сигнал от неё падает. Образуется характерная пеленгационная характеристика (ПХ), представляющая поведение амплитуды сигнала в зависимости от положения центра проекции. Аппроксимация сигнала моделью позволяет в значительной степени выровнять амплитуду. На рис. 6, 7 видно поведение амплитуды исходного сигнала и моделей в различных точках траектории.

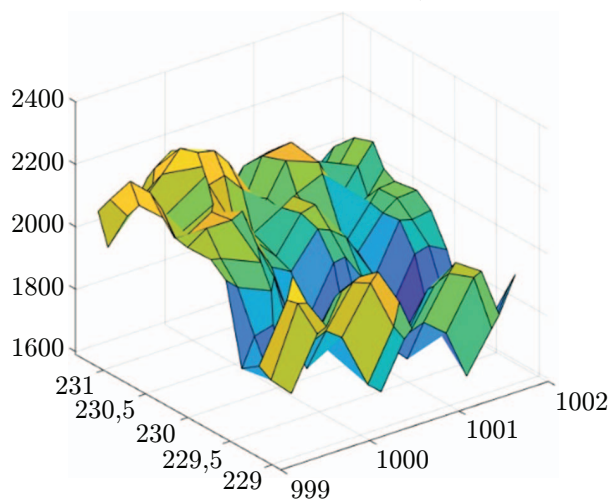
Цифры на правой оси соответствуют номеру строки вдоль направления сканирования. Левая ось показывает номер пикселя в строке. Пеленгационная характеристика выравнивается вдоль направления сканирования. Неравномерность амплитуды вдоль строки

Т а б л и ц а 3
Зависимость погрешности оценивания координат от шума

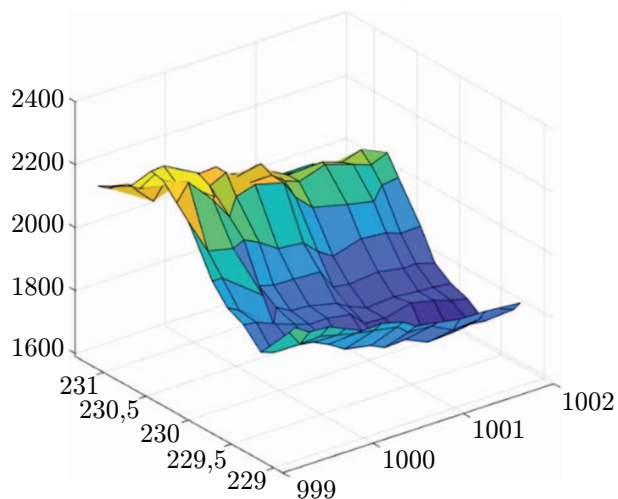
Модель	СКО шума			
	Режим АС		Режим DC	
	40	200	40	200
Gauss	0,03	0,16	0,02	0,12
Besselh	0,03	0,27	0,02	0,13
GEDF 1,5	0,03	0,19	0,02	0,14

a

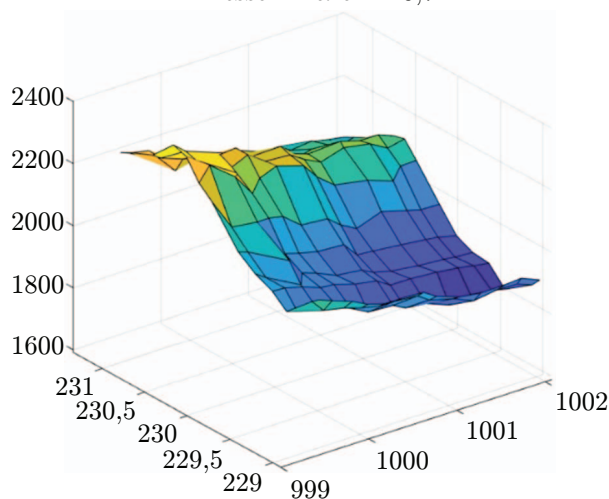
Объект пеленг 16,82

*b*

Gauss пеленг 11,44

*c*

Besselh пеленг 10,71

*d*

err1,5с пеленг 12,51

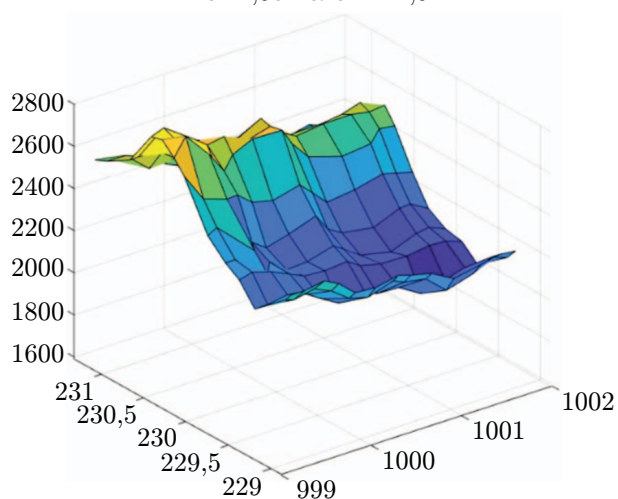


Рис. 6. Изменение пеленгационной характеристики при применении разных моделей в режиме АС: *a* — исходная ПХ, *b* — Gauss, *c* — Besselh, *d* — GEDF 1,5. Размах ПХ (в процентах от среднего значения) приведён в заголовках рисунков

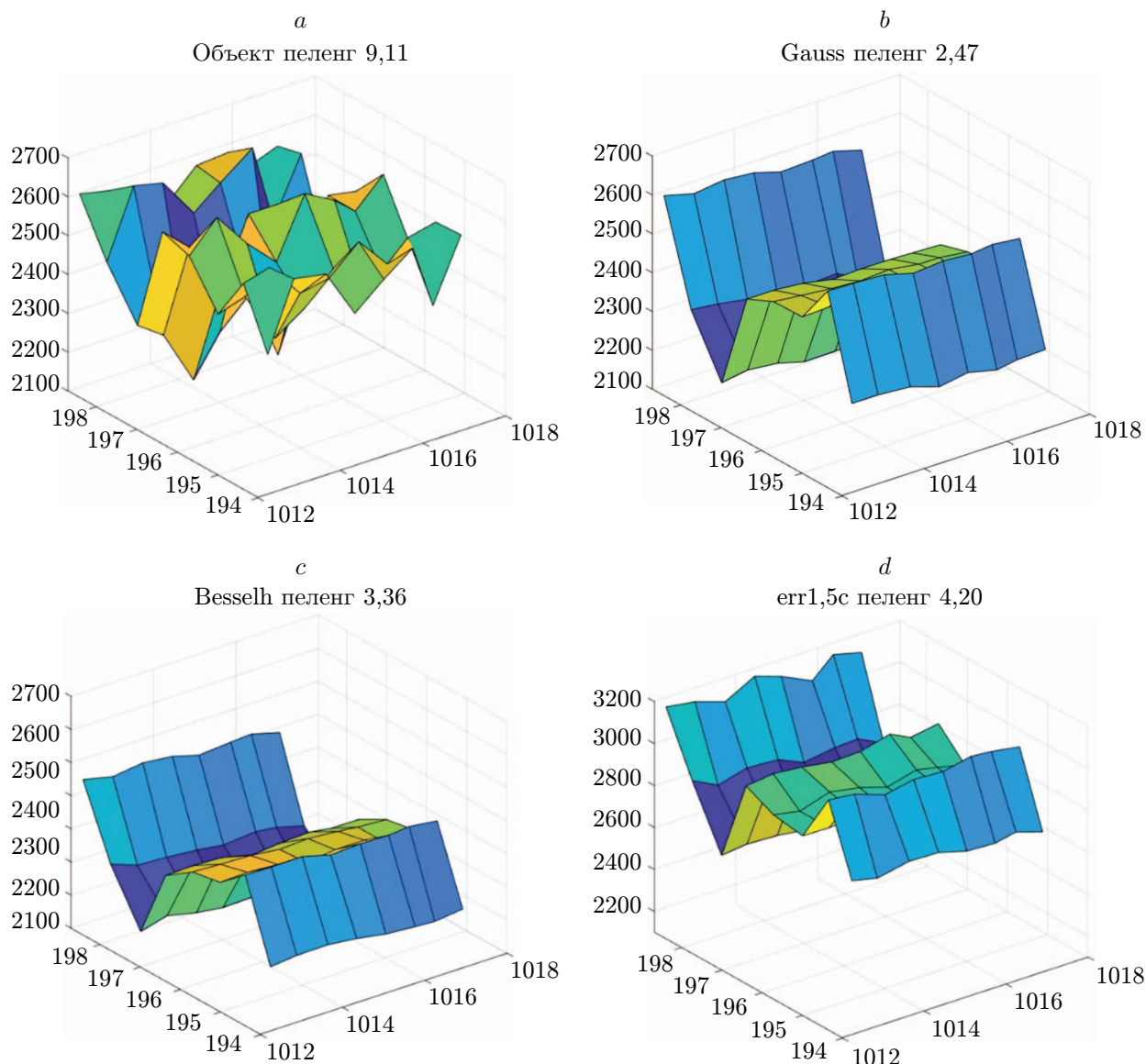


Рис. 7. Изменение пеленгационной характеристики при применении разных моделей в режиме DC: *a* — исходная ПХ, *b* — Gauss, *c* — Besselh, *d* — GEDF 1,5

вызвана, скорее всего, недостаточной компенсацией неравномерности чувствительности субматриц фотоприёмника.

Заключение. В работе исследована возможность применения моделей, аппроксимирующих формируемые матричным фотоприёмником изображения подвижных малоразмерных объектов, для повышения точности измерения их координат и яркости. Рассмотрены четыре достаточно распространённых метода аппроксимации, и на основе экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях сканирующего многорядного фотоприёмного устройства, оценены и представлены зависимости ошибок измерения от смещения проекции объекта относительно решётки фоточувствительных ячеек приёмника и уровня шума, сопровождающего формирование исходного изображения. Основные результаты применения выбранных аппроксимирующих моделей заключаются в следующем.

По возрастанию величины остаточной разности методы аппроксимации располагают-

ся в следующем порядке: GEDF, GEDF 1,5, Gauss, Besselh. Первые два метода обеспечивают значительно меньшие остаточные значения.

При уровне шума менее 0,1 % максимального значения сигнала от объекта максимальные случайные ошибки оценивания координат с применением перечисленных моделей не превышали 0,06 пикселя.

Нормальный случайный шум слабо влияет на точность оценок координат до отношений сигнал/шум, по крайней мере, 50. При отношении сигнал/шум порядка 10 меньшие погрешности обеспечивает гауссова модель.

Аппроксимация выравнивает пеленгационную характеристику приёмника вдоль направления сканирования. Неравномерность вдоль линеек остаётся, требуется более тщательное выравнивание чувствительности ФЧЯ в линейках.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121022000116-0).

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гридин А. С., Дмитриев И. Ю., Васильев В. Н.** Влияние пеленгационных характеристик и разброса чувствительности элементов фотоприемника на распределение пороговой чувствительности оптико-электронного прибора // Тр. VII Междунар. конф. «Прикладная оптика-2006». С.-Пб.: ГИТМО(ТУ), 2007. Т. 1. С. 139–144.
2. **Samson V., Champagnat F., Giovannelli J.-F.** Point target detection and subpixel position estimation in optical imagery // Appl. Opt. 2004. **43**, Iss. 2. P. 257–263.
3. **Жегалов С. И., Соляков В. Н.** Нейронная схема формирования изображения для ФПУ с микросканированием // Успехи прикладной физики. 2014. **2**, № 4. С. 398–402.
4. **Соляков В. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А.** Компьютерная модель процесса регистрации точечных источников излучения многорядными ФПУ с режимом ВЗН // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 54–57.
5. **Киричук В. С., Косых В. П., Курманбек уулу Т.** Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // Автометрия. 2006. **42**, № 1. С. 3–12.
6. **Меденников П. А.** Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // Оптический журнал. 2019. **86**, № 8. С. 65–69.
7. **Осадчий И. С.** Метод субпиксельного измерения координат изображений звёзд для приборов астроориентации космического базирования // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 5.
8. **Козлов К. В., Патрашин А. И., Стрельцов В. А.** Математическая модель крупноформатного инфракрасного фотоприемного устройства при временной задержке и накоплении // Успехи прикладной физики. 2017. **5**, № 2. С. 155–173.
9. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 814 с.
10. **Graham L. G.** A Generalized Error Distribution. URL: <https://ssrn.com/abstract=2265027> (дата обращения: 01.07.2024).
11. **Бочков В. Д., Дrajников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.** Пространственно-временное преобразование информации в многорядных матричных ФПУ // Успехи прикладной физики. 2014. № 1. С. 71–76.

Поступила в редакцию 01.07.2024

После доработки 05.07.2024

Принята к публикации 24.07.2024