

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭКРАНИРОВАНИЯ
ВХОДНОГО ЗРАЧКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
НА ПЕЛЕНГАЦИОННУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ МАТРИЧНОГО
ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ
ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

А.А. Закутаев

zakutaev.a@mail.ru

М.К. Орехова

marorekhova@gmail.com

А.А. Михайлов

lol.ichi@yandex.ru

В.В. Ширококов

17126vlad@yandex.ru

ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Исследовано влияние центрального экранирования входного зрачка оптико-электронной системы на пеленгационную характеристику матричного фотоприемника при наблюдении удаленных объектов. Разработан математический аппарат для расчета потерь сигнала при случайном положении объекта относительно фоточувствительных элементов. Выполнен анализ существующих методик оценивания пеленгационной характеристики, выделены их основные преимущества и недостатки. Предложена математическая модель, позволяющая оценить пеленгационную характеристику матричного фотоприемника в составе оптико-электронной системы с экранированием входного зрачка. С помощью предложенной модели рассчитаны пеленгационные характеристики системы с линейным коэффициентом экранирования входного зрачка $\eta = 0-0,4$, а также получена функция распределения вероятности события с долей сигнала, зарегистрированного в ближайшем к центру изображения объекта наблюдения фоточувствительном элементе, которая будет меньше или равна определенному значению. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов для разных степеней экранирования входного зрачка. Построение функции распределения вероятности для различных зон экранирования с использованием предложенного подхода позволяет количественно оценить его влияние на поро-

Ключевые слова

Оптико-электронная система, матричное фотоприемное устройство, экранирование входного зрачка, пеленгационная характеристика, обнаружение

Введение. Матричный фотоприемник (МФП) является ключевым элементом в составе современных оптико-электронных систем (ОЭС). Важной характеристикой дискретных МФП, определяющих эффективность работы устройства, является коэффициент заполнения. Этот параметр отражает отношение площади светочувствительной области приемника к его общей площади и напрямую влияет на светособирающую способность устройства. Чем выше коэффициент заполнения, тем больше светового потока попадает на светочувствительные элементы, что улучшает пороговую чувствительность МФП и положительно влияет на обнаружительные характеристики ОЭС.

В современных технологиях производства дискретных МФП достижение высокого коэффициента заполнения является важной задачей [1–3], особенно в условиях миниатюризации фоточувствительных элементов (ФЧЭ). Однако увеличение значений этого параметра зачастую связано с техническими трудностями [4, 5], например, с необходимостью размещения дополнительных элементов управления и межэлементных соединений. Кроме того, уменьшение размера ФЧЭ ухудшает пороговую чувствительность МФП.

Многие работы посвящены анализу влияния параметров МФП на потери полезного сигнала. Эти исследования преимущественно фокусируются на идеализированных случаях. В [6, 7] оценка обнаружительных характеристик ОЭС проводилась при условии соосности центров изображения и ФЧЭ. В [8] внимание уделено наихудшей ситуации, когда центр изображения оказывается между ФЧЭ. На практике при решении задач поиска и обнаружения объектов их точное положение относительно ФЧЭ заранее неизвестно. Это указывает на то, что проекция изображения объекта может находиться в любой точке и потери сигнала из-за нечувствительных зон носят случайный характер. Для оценки таких потерь требуется вероятностный подход.

Отличительной особенностью настоящего исследования является использование в расчетной модели ОЭС дифракционного подхода, что необходимо для формирования требований к высокоточным приборам и системам. Как правило, в некоторых работах [9–14] функция рассеяния точки (ФРТ) рассмотрена как гауссоида или применен коэффициент, согласующий размеры ФЧЭ и центральное пятно ФРТ.

Для предварительной оценки влияния коэффициента заполнения МФП на качество получаемого оптического изображения можно построить математическую модель, используя как критерий пеленгационную характеристику МФП [6]. Пеленгационная характеристика — это важный параметр, используемый во многих областях для определения направления на источник сигнала. С помощью пеленгационной характеристики описывают способность оптической системы (ОС) или устройства определять угловое положение объекта относительно заданной системы координат.

Исследование вопросов обнаружения удаленных малоразмерных объектов, которые включают в себя приведенные требования, выполнено в [15]. Расчет проведен с условием равномерного пропускания в плоскости входного зрачка, изучено влияние экранирования в ОЭС на пеленгационную характеристику МФП. В связи с этим описанный далее подход был доработан.

Цель настоящей работы — представить результаты разработки математического аппарата для расчета потерь сигнала при случайном положении объекта относительно ФЧЭ.

Материалы и методы. Описание подхода к оцениванию ОЭС с центральным экранированием входного зрачка. Экранирование ОС является характерной чертой большинства зеркальных и зеркально-линзовых схем (рис. 1), например, схем Кассегрена, Грегори и др.

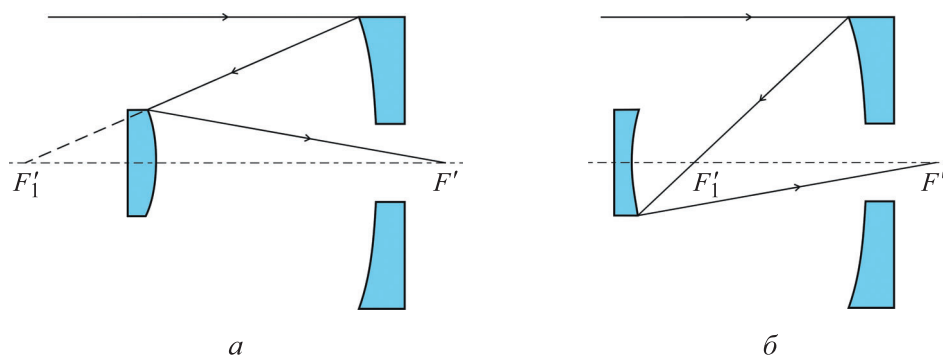


Рис. 1. Экранирование ОС по схемам Кассегрена (а) и Грегори (б)

Оптические системы с экранированием широко применяют в качестве астрономических, фотографических и микроскопических объективов [16, 17]. Посредством экранирования решается задача конструктивного построения таких схем, однако вырезание центральной области входного зрачка ОС чаще всего негативно сказывается на качестве изоб-

ражения. Ухудшение качества ОС при экранировании ее входного зрачка связано с изменением формы светового сигнала и уменьшением его площади. Это ухудшение напрямую зависит от вырезанной области и определяется линейным коэффициентом экранирования: $\eta = d/D$, где d — диаметр экрана; D — диаметр входного зрачка ОС.

При наличии в ОС центрального экранирования наблюдается перераспределение световой энергии из центрального диска Эйри в его кольца, благодаря чему максимум освещенности заостряется и тогда наблюдается уменьшение эффективного диаметра кружка. Освещенность в центре фигуры рассеяния при наличии экранирования можно предварительно оценить следующим образом [18]: $E_0 = (1 - \eta^2)^2 E_D$, где E_D — освещенность в центре диска Эйри при отсутствии экранирования. Согласно формуле, при экранировании ОС ($\eta = 0,4$) освещенность центра пятна рассеяния снижается на ~30 %. Наглядное представление перераспределения освещенности в диске Эйри ОС без и с экранированием $\eta = 0,4$ приведено на рис. 2. Видно наращивание энергии внутри первого кольца, а также некоторое уменьшение эффективного диаметра диска. Таким образом, в условиях обнаружения удаленных малоразмерных объектов указанные явления следует учитывать на ранних этапах разработки ОЭС.

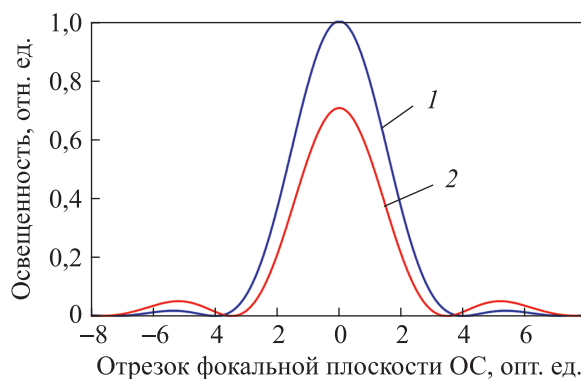


Рис. 2. Перераспределение освещенности в диске Эйри ОС без (1) и с экранированием $\eta = 0,4$ (2)

В идеальном случае для исследования влияния экранирования входного зрачка ОС на пеленгационную характеристику может быть использована ФРТ идеальной ОС, описываемая функцией J_1 Бесселя 1-го порядка [18]. Под идеальной ОС понимается безаберрационная система с равномерным по зрачку амплитудным пропусканием. Такая ФРТ определяется следующим выражением:

$$PSF(x, y) = K_1 \left[\frac{2J_1(z)}{z} \right]^2,$$

где PSF — функция рассеяния точки; x, y — координаты точки в плоскости МФП; K_1 — коэффициент пропорциональности, описывающий потери сигнала при его распространении в ОС;

$$z = \frac{\pi D_{\text{вх.зр}} \sqrt{x^2 + y^2}}{f\lambda}$$

— аргумент функции; здесь $D_{\text{вх.зр}}$ — диаметр входного зрачка объектива ОЭС; f — фокусное расстояние; λ — длина волны оптического излучения.

Если ОС имеет центральное экранирование, т. е. ее апертурная диафрагма представляет собой кольцо с коэффициентом экранирования η , то распределение освещенности в ФРТ будет описываться следующим образом:

$$PSF_E(x, y) = \frac{K_1}{(1 - \eta^2)^2} \left[\frac{2J_1(z)}{z} - \eta^2 \frac{2J_1(z_1)}{z_1} \right]^2, \quad (1)$$

где $z_1 = \eta z$ — вспомогательный параметр.

Для оценки влияния экранирования ОС на пеленгационную характеристику используется математический аппарат, приведенный в [15]. Суть расчетов состоит в генерации ФРТ в соответствии с (1), а затем поэлементном наложении полученного диска Эйри на ортогонально расположенные ФЧЭ с размером стороны a и нефоточувствительным промежутком Δa между ними (рис. 3). Центр изображения сдвигается и конечная доля регистрируемого сигнала суммируется. Полученные данные представляют собой значения

пеленгационной характеристики МФП в виде двумерной выборки.

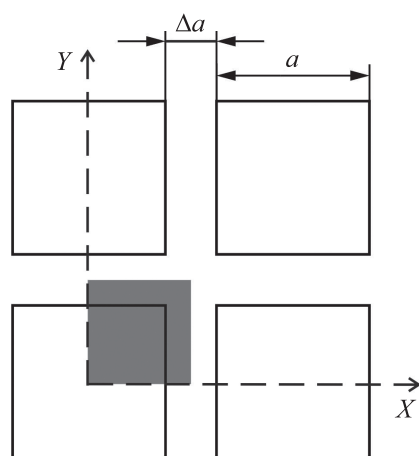


Рис. 3. Схема части МФП: поэлементное наложение полученного диска Эйри на ортогонально расположенные ФЧЭ с размером стороны a и нефоточувствительным промежутком Δa ; серый квадрат — область расчетов по предлагаемому математическому аппарату

Для упрощения расчетов можно использовать лишь четверть значащей квадратной области (выделена серым цветом на рис. 3). Поверхность МФП разбивается на необходимое число дискрет.

Входная амплитуда нормирована по единице, поэтому полученные значения доли сигнала $N_{\text{рег}}$ будут находиться в диапазоне $[0; 1]$. Тогда результаты расчетов можно разделить на 100 интервалов ΔN_i и вычислить число элементарных площадок q_i , для которых доли сигнала попадают в заданные интервалы при разных положениях центра изображения. Значение вероятности попадания сигнала в интервал P_i определяется как $P_i = q_i / S$, где S — число всех элементарных площадок q_i .

Основываясь на принципах теории вероятностей [19], функция распределения дискретной случайной величины $F(x)$ формируется путем сложения вероятностей всех значений, не превышающих заданный порог x . В контексте решаемой задачи такая функция будет иметь вид

$$F(U_{pj}) = P_j(U_{pj} \leq \max \Delta U_{pj}) = \sum_{i=1}^j P_j.$$

Учитывая, что обнаружение сигнала эквивалентно его превышению заданного порога, вероятностный вклад, вносимый пеленгационной характеристикой МФП в процесс регистрации сигнала от объекта наблюдения, должен оцениваться через вероятность указанного превышения [20]. Таким образом, на практике следует применять следующее выражение:

$$P_j(U_{pj} \leq \max \Delta U_{pj}) = F^{-1}(U_{pj}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^j P_j}. \quad (2)$$

Результаты применения предложенного подхода для оценки обнаружительных характеристик ОЭС с центральным экранированием входного зрачка. Приведем характеристики ОЭС, используемые для расчетов: диаметр входного зрачка 0,36 м; фокусное расстояние 2 м; размер ФЧЭ 6×6 мкм; расстояние между ФЧЭ 2 мкм по горизонтали и 2 мкм по диагонали; рабочая длина волны 0,535 мкм.

При расчетах приняты следующие допущения:

- входной зрачок экранирован; линейный коэффициент экранирования варьируется в пределах $\eta = 0-0,4$ с шагом 0,05;
- ОС безабберационная; ФРТ оценивается в пределах третьего дифракционного кольца;

- значение коэффициента $K_1 = 1$;
- размер элементарной площадки 10×10 мкм.

Пеленгационные характеристики g в пределах значащей области с учетом равновероятного расположения геометрического центра изображения наблюдаемого объекта в каждой дискретной ячейке ФЧЭ приведены на рис. 4, видна существенная потеря сигнала ввиду уменьшения площади входного зрачка. Наиболее удачный случай — соосное попадание ФРТ на ФЧЭ — характеризуется снижением на ~60 % доли зарегистрированного сигнала.

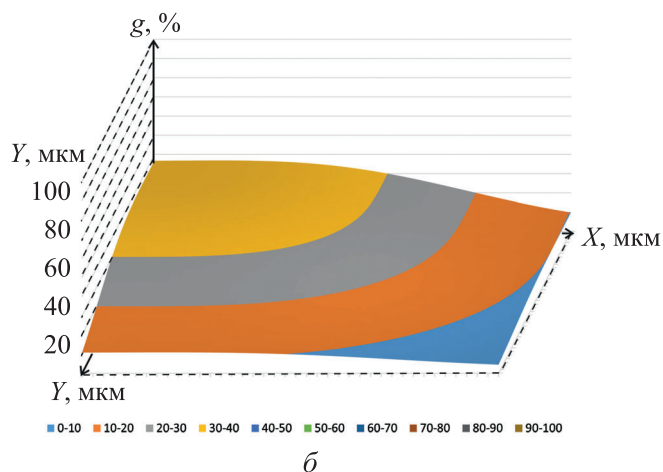
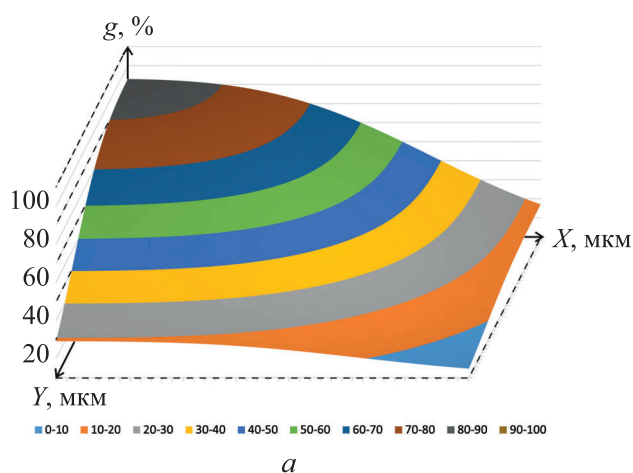


Рис. 4. Пеленгационные характеристики ОЭС в пределах значащей области с учетом равновероятного расположения геометрического центра изображения наблюдаемого объекта в каждой дискретной ячейке ФЧЭ без (а) и с экранированием $\eta = 0,4$ (б)

Статистическая оценка пеленгационной характеристики по рассчитанным данным дает следующий результат: математическое ожидание для ОЭС без экранирования составляет 0,44, а для ОЭС с экранированием $\eta = 0,4$ — 0,23, дисперсия этих значений составляет 0,23 и 0,06.

Сечение пеленгационной характеристики вдоль оси ОУ для ОЭС с экранированием приведено на рис. 5. Коэффициент экранирования η изменялся в пределах от 0 до 0,4. По графикам можно оценить ухудшение уровня регистрируемого сигнала с увеличением зоны экранирования.

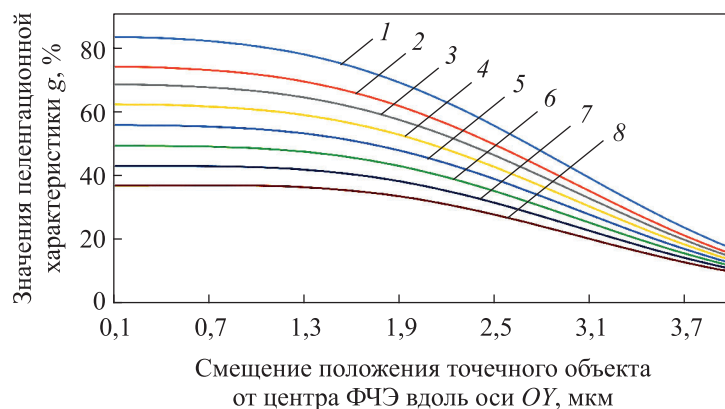


Рис. 5. Сечение пеленгационной характеристики вдоль оси ОУ для ОЭС с экранированием $\eta = 0$ (1), 0,1 (2), 0,15 (3), 0,2 (4), 0,25 (5), 0,3 (6), 0,35 (7), 0,4 (8)

Зависимости $F^{-1}(U_p)$ в соответствии с (2) для рассчитанных значений пеленгационной характеристики ОЭС с экранированием приведены на рис. 6. Видно, что при наличии экранирования с коэффициентом $\eta = 0,4$ в ОЭС порог обнаружения снижается более чем в 2 раза.

На рис. 6 можно выделить четыре различные зоны.

Первая зона: регистрация 0...5 % сигнала. Здесь, вне зависимости от степени экранирования входного зрачка, вероятность обнаружения равна единице.

Вторая зона: резкое снижение вероятности с 1 до ~0,9. Доля регистрируемого сигнала в этой зоне разделяется относительно степени экранирования и находится в пределах 5...15 % для ОЭС без экранирования и в пределах 5...9 % для ОЭС с $\eta = 0,4$.

Третья зона: вероятность регистрации сигнала составляет 0,9–0,1. Наблюдается общий тренд на уменьшение вероятности обнаружения объекта наблюдения. Доля регистрируемого сигнала составляет 15...77 % для ОЭС без экранирования и 9...36 % для ОЭС с $\eta = 0,4$.

Четвертая зона: вероятность регистрации сигнала составляет 0,1–0. Наблюдается резкий спад вероятности регистрации, что особенно видно по функции распределения для ОЭС с коэффициентом экранирования $\eta = 0,4$. Каждая последующая функция при достижении нуля по оси OX отстает в среднем на 7 %. Максимальная доля регистрируемого сигнала для ОЭС без экранирования составляет 83 %, для ОЭС с экранированием $\eta = 0,4$ — 37 %.

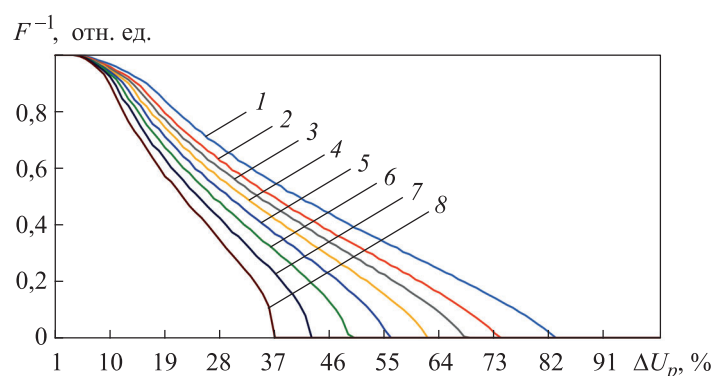


Рис. 6. Зависимости $F^{-1}(U_p)$ в соответствии с (2) для рассчитанных значений пеленгационной характеристики ОЭС с экранированием (значения η см. рис. 5)

Зависимость, описывающая это ухудшение, близка к линейной. Снижение уровня сигнала при удалении ФРТ от центра ФЧЭ тем равномернее, чем выше степень экранирования: при его отсутствии угол наклона касательной в точках функции увеличивается достаточно быстро. В случае максимального экранирования, принятого в работе ($\eta = 0,4$), уровень сигнала меняется слабо при смещении ФРТ от центра ФЧЭ почти на треть значащей области. Это соотносится с графиком значений пеленгационной характеристики (см. рис. 5), а также подтверждается статистическим анализом. Сосредоточение значений пеленгационной характеристики в пределах меньшей области для ОЭС с экранированием может быть полезным при выборе наиболее оптимального отношения сигнал/шум. Это также позволяет повысить достоверность обнаружения объекта наблюдения.

Заключение. Исследовано влияние экранирования входного зрачка ОЭС на пеленгационную характеристику МФП. Изучение эффектов перераспределения энергии в экранированном входном зрачке ОЭС велось с помощью предложенного математического аппарата, особенностью ко-

торого является формирование дискретной области, в пределах которой выполняется численный расчет ограниченной до третьего кольца ФРТ. Часть операций с помощью аппарата также может выполняться параллельно, что в совокупности с невысокой вычислительной сложностью обуславливает быстроту процессов.

Графически приведены вычисленные с использованием предложенного математического аппарата значения пеленгационной характеристики для ОЭС с линейным коэффициентом экранирования $\eta = 0-0,4$ при условии равновероятного падения ФРТ на значащую область МФП. Полученные результаты демонстрируют существенное влияние экранирования входного зрачка на пеленгационные характеристики ОЭС, а следовательно, и на оценку регистрируемого сигнала, что неотрывно связано с обнаружительными характеристиками ОЭС.

Приведена зависимость значения вероятности обнаружения сигнала, полученного с помощью ОЭС с экранированием, и выполнен статистический анализ. Полученные данные и предложенный математический аппарат могут быть использованы для оценки обнаружительных и пороговых характеристик ОЭС на ранних стадиях разработки прибора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gounella R., Ferreira G.M., Amorim M.L.M., et al. A review of optical sensors in CMOS.2. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 4, art. 691. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13040691>
- [2] Иванов В.А., Киричук В.С., Косых В.П. и др. Особенности обнаружения точечных объектов в изображениях, формируемых матричным приемником. *Автоматрия*, 2016, т. 52, № 2, с. 10–19. DOI: <https://doi.org/10.15372/AUT20160202>
- [3] Гауэр Дж. Оптические системы связи. М., Радио и связь, 1989.
- [4] Бурлаков И.Д., Кузнецов С.А., Яковлев А.Ю. Современные тенденции развития фотоэлектроники. *Успехи прикладной физики*, 2022, т. 10, № 4, с. 351–380. EDN: NBMZHF
- [5] Сафонов А.Г. Матричные КМОП-фотоприемники: современное состояние и перспективы развития. *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*, 2019, № 2, с. 140–154. DOI: <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.183.2.140.154>
- [6] Дахин А.М., Фантиков О.И. Влияние дискретности фотоприемника на пороговую чувствительность телевизионной системы обнаружения. *Техника средств связи. Сер. Техника телевидения*, 1983, № 1, с. 50–59.
- [7] Баранов П.С., Манцветов А.А. Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пиксела для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*, 2016, № 2, с. 49–53. EDN: WBXGTD

- [8] Старовойтов Е.И., Юрчик И.А. Метод снижения потерь при обнаружении динамического точечного объекта лазерной локационной системой с линейкой фотодетекторов. *Радиостроение*, 2019, № 1. EDN: JPWDYI
- [9] Иванов В.Г., Каменев А.А. Оценивание дальности обнаружения космических объектов бортовой многоспектральной оптико-электронной аппаратурой с матричными фотоприемными устройствами смотрящего типа. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения*, 2016, № 3, с. 14–22. EDN: WKODOB
- [10] Логунов С.В., Черногубов А.В., Федоренко Д.С. Моделирование процесса спектрофотометрирования искусственного спутника Земли. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения*, 2019, № 1, с. 10–21. EDN: ZBNDZJ
- [11] Иванов В.Г., Каменев А.А. Оценивание возможностей обнаружения малоразмерных космических объектов наземными оптико-электронными средствами со сверхдлиннофокусными телескопами. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения*, 2019, № 3, с. 47–52. EDN: ZJELYO
- [12] Онуфрей А.Ю., Разумов А.В., Ваганов А.В. Метод оценивания достоверности информации об обнаружении малоразмерных высокотемпературных объектов. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения*, 2020, № 4, с. 89–96. EDN: FNRLBU
- [13] Знаменский И.В., Зотьев Е.О., Олейников И.И. и др. Зависимость величины сигнала от смещения функции рассеяния точки, вписанной в четыре пиксела матрицы. *Журнал радиоэлектроники*, 2024, № 9. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.3>
- [14] Закутаев А.А., Емельянов, А.В., Михайлов А.А. Влияние шовности матричных фотоприемных устройств на обнаружительные характеристики оптико-электронных средств. *Радиолокационное исследование природных сред. Матер. XXXIII Всерос. симп.* СПб., ВКА, 2024, с. 305–310. EDN: HSYEDX
- [15] Закутаев А.А., Михайлов А.А., Лизан В.М. Исследование вопросов обнаружения удаленных объектов в условиях априорной неопределенности их положения в поле зрения оптико-электронного средства. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2024, № 10, с. 268–273. EDN: HVIBVN
- [16] Максutow Д.Д. *Астрономическая оптика*. Л., Наука, 1979.
- [17] Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И. и др. *Микроскопы*. М., Машиностроение, 1969.
- [18] Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. М., Наука, 1973.
- [19] Галягев А.А., Лысенко П.В., Берлин Л.М. Статистическая сложность как критерий задачи обнаружения полезного сигнала. *Автоматика и телемеханика*, 2023, № 7, с. 121–145. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0005231023070073>
- [20] Poor H.V. *An introduction to signal detection and estimation*. New York, Springer, 1994.

Закутаев Александр Александрович — начальник 562 лаборатории Военного института (научно-исследовательского) ВКА им. А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

Орехова Мария Кирилловна — канд. техн. наук, младший научный сотрудник 563 лаборатории Военного института (научно-исследовательского) ВКА им. А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

Михайлов Александр Александрович — младший научный сотрудник 562 лаборатории Военного института (научно-исследовательского) ВКА им. А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

Широбоков Владислав Владимирович — канд. техн. наук, докторант 5 управления Военного института (научно-исследовательского) ВКА им. А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Закутаев А.А., Орехова М.К., Михайлов А.А. и др. Оценка влияния коэффициента экранирования входного зрачка оптической системы на пеленгационную характеристику матричного фотоприемного устройства при наблюдении точечных объектов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 2 (155), с. 4–18. EDN: ELJPRK

**EVALUATION OF THE ENTRANCE PUPIL OBSCURATION RATIO
INFLUENCE ON THE ANGULAR RESOLUTION CHARACTERISTICS
OF A MATRIX PHOTODETECTOR WHEN OBSERVING
POINT SOURCES**

A.A. Zakutaev

zakutaev.a@mail.ru

M.K. Orekhova

marorekhova@gmail.com

A.A. Mikhailov

lol.ichi@yandex.ru

V.V. Shirobokov

17126vlad@yandex.ru

**Military Aerospace Academy n.a. A.F. Mozhaisky, St. Petersburg,
Russian Federation**

Abstract

The article examines the impact of central obscuration in an optical-electronic system's entrance pupil on the angular resolution characteristics of a matrix photodetector during remote point source observation. The primary objective is to develop a mathematical model for analyzing signal losses caused by random point source positioning relative to photosensitive

Keywords

Optical-electronic system, matrix photodetector, entrance pupil obscuration, angular resolution characteristic, threshold sensitivity

elements. A critical review of existing angular resolution evaluation methods was conducted, identifying their key advantages and limitations. The mathematical model is proposed for assessing the angular resolution characteristics of matrix photodetectors in optical-electronic systems with obscured entrance pupils. Using this model, angular resolution characteristics are calculated for systems with linear obscuration ratios ranging from $\eta = 0-0.4$ (relative units). The study derived probability distribution functions for cases where the signal portion registered by the photosensitive element nearest to the observed object's image center would be less than or equal to specified values. The comparative analysis of results across different obscuration levels was performed. The developed approach enables quantitative evaluation of obscuration effects on system threshold sensitivity through probability distribution functions for various obscuration zones. This methodology proves particularly valuable during early-stage development of optical-electronic systems

Received 31.10.2025

Accepted 24.04.2026

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Gounella R., Ferreira G.M., Amorim M.L.M., et al. A review of optical sensors in CMOS.2. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 4, art. 691.
DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13040691>
- [2] Ivanov V.A., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., et al. Specific features of detecting point objects in images formed by a detector array. *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699016020023>
- [3] Gowar J. Optical communication systems. Prentice Hall, 1984.
- [4] Burlakov I.D., Kuznetsov S.A., Yakovlev A.Yu. Current trends in the development of photoelectronics. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2022, vol. 10, no. 4, pp. 351–380 (in Russ.). EDN: NBMZHF
- [5] Safonov A.G. CMOS photodetector arrays: current state and development prospects. *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2019, no. 2, pp. 140–154 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.183.2.140.154>
- [6] Dakhin A.M., Fantikov O.I. The influence of photodetector discreteness on the threshold sensitivity of a television detection system. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika televideniya*, 1983, no. 1, pp. 50–59 (in Russ.).
- [7] Baranov P.S., Mantsvetov A.A. Optimization of the relationship of lens dissipation disk and pixel size to improve the precision of the coordinates of a small object image.

- Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics], 2016, no. 2, pp. 49–53 (in Russ.). EDN: WBXGTD
- [8] Starovoytov E.I., Yurchik I.A. Loss-reducing method in detecting dynamic point object by a laser ranging system based on a line of photo-detectors. *Radiostroenie* [Radio Engineering], 2019, no. 1 (in Russ.). EDN: JPWDYI
- [9] Ivanov V.G., Kamenev A.A. Estimation of space objects detection range by the onboard multi-spectral optical-electronic equipment with staring photodetectors. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*, 2016, no. 3, pp. 14–22 (in Russ.). EDN: WKODOB
- [10] Logunov S.V., Chernogubov A.V., Fedorenko D.S. Modeling the process of spectrophotometry of an artificial satellite of the earth. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*, 2019, no. 1, pp. 10–21 (in Russ.). EDN: ZBNDZJ
- [11] Ivanov V.G., Kamenev A.A. Estimation of possibilities of detection of small space objects by ground optical-electronic means with ultra-long-focus telescopes. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*, 2019, no. 3, pp. 47–52 (in Russ.). EDN: ZJELYO
- [12] Onufrey A.Yu., Razumov A.V., Vaganov A.V. Method for evaluating the reliability of information about the detection of small-sized high-temperature objects. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*, 2020, no. 4, pp. 89–96 (in Russ.). EDN: FNRLBU
- [13] Znamenskiy I.V., Zotyev E.O., Oleynikov I.I., et al. Dependence of the signal magnitude on the displacement of the scattering function of a point inscribed in four pixels of the matrix. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2024, no. 9 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.3>
- [14] Zakutaev A.A., Emelyanov, A.V., Mikhaylov A.A. [The influence of the seam density of matrix photodetectors on the detection characteristics of optoelectronic devices]. *Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnnykh sred. Mater. XXXIII Vseros. Simp.* [Radar Research of Natural Environments. Proc. XXXIII Russ. Symposium]. St.-Petersburg, VKA Publ., 2024, pp. 305–310 (in Russ.). EDN: HSYEDX
- [15] Zakutaev A.A., Mikhaylov A.A., Lizan V.M. Study of the issues of detecting remote objects under conditions of a priori uncertainty of their position in the field of view of an optical-electronic means. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2024, no. 10, pp. 268–273 (in Russ.). EDN: HVIBVN
- [16] Maksutov D.D. *Astronomicheskaya optika* [Astronomic optics]. Leningrad, Nauka Publ., 1979.
- [17] Skvortsov G.E., Panov V.A., Polyakov N.I., et al. *Mikroskopy* [Microscopes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969.
- [18] Born M., Wolf E. *Principles of optics*. Pergamon Press, 1964.
- [19] Galyagev A.A., Lysenko P.V., Berlin L.M. Statistical complexity as a criterion for the useful signal detection problem. *Autom. Remote Control.*, 2023, vol. 84, no. 7, pp. 753–771. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117923070056>

[20] Poor H.V. An introduction to signal detection and estimation. New York, Springer, 1994.

Zakutaev A.A. — Head of the Laboratory 562 of the Military Research Institute, Military Aerospace Academy n.a. A.F. Mozhaisky (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

Orekhova M.K. — Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher, Laboratory 563 of the Military Research Institute, Military Aerospace Academy n.a. A.F. Mozhaisky (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

Mikhailov A.A. — Junior Researcher, Laboratory 562 of the Military Research Institute, Military Aerospace Academy n.a. A.F. Mozhaisky (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

Shirobokov V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Doctoral Student, Department 5 of the Military Research Institute, Military Aerospace Academy n.a. A.F. Mozhaisky (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Zakutaev A.A., Orekhova M.K., Mikhailov A.A., et al. Evaluation of the entrance pupil obscuration ratio influence on the angular resolution characteristics of a matrix photodetector when observing point sources. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 2 (155), pp. 4–18 (in Russ.). EDN: ELJPRK