

## Аналитический метод оценки параметров инфракрасного многорядного фотоприемного устройства

К. В. Козлов, В. А. Стрельцов, А. И. Патрашин, В. П. Косых, Г. И. Громили

*Представлен аналитический метод расчета параметров инфракрасного (ИК) фотоприемного устройства с заданной топологией матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ), осуществляющего регистрацию малоразмерных объектов в режиме линейного сканирования. Метод позволяет оценить отношение сигнал/шум и пространственное разрешение ИК фотоприемного устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) с учетом функции рассеяния точки оптической системы, пространственного распределения чувствительности фоточувствительных элементов (ФЧЭ), параметров дискретизации, ВЗН-суммирования и накопления, значений дробового шума и шума считывания, согласованного суммирования выходных сигналов ИК ФПУ. Проведена оценка пространственного разрешения ИК ФПУ в направлении сканирования, а также в направлении, ортогональном сканированию по двум малоразмерным объектам и по гармоническим мирам в зависимости от параметров топологии МФЧЭ. Найдены оптимальные размеры ФЧЭ (обеспечивающие максимальное отношение сигнал/шум, пространственное разрешение системы при этом не учитывалось) при регистрации пятна излучения в плоскости МФЧЭ, расположенного в максимуме/минимуме пеленгационной характеристики, с учетом/без учета шума считывания, с учетом/без учета дополнительной пространственной обработки выходных сигналов.*

*Ключевые слова:* ВЗН, топология, МФЧЭ, ФПУ, БИС считывания, малоразмерный объект, согласованный фильтр.

### Введение

Современные инфракрасные (ИК) фотоприемные устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) [1–4] широко применяются для регистрации слабых оптических сигналов. Сканирующие ВЗН-матрицы позволяют

достичь высокой равномерности пеленгационной характеристики при регистрации малоразмерных объектов, повысить отношение сигнал/шум на выходе прибора, снизить требования к дефектности фоточувствительного материала. Каскадирование отдельных фотоприемных модулей (ФМ) на общем основании внутри ФПУ при работе в режиме сканирования позволяет достичь расширенных форматов ИК-изображений, больших 10000×10000 элементов разложения.

В оптико-электронных системах (ОЭС) применяют различные способы сканирования, при этом наиболее распространенные описаны в [5]. В рамках данной работы будем рассматривать системы с линейным сканированием (без микросканирования), часто используемые для регистрации сигналов в режиме ВЗН. Топология матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) таких систем, как правило, состоит из набора смещенных субматриц, что повышает частоту пространственной дискретизации изображения сцены.

Целью данной работы является представление и обоснование расчетного метода оценки параметров ИК ФПУ с режимом ВЗН, осуществляющих регистрацию малоразмерных объектов (МО), в зависимости от параметров топологии МФЧЭ.

**Козлов Кирилл Владимирович**<sup>1,2</sup>, инженер 1 кат., аспирант.  
**Стрельцов Вадим Александрович**<sup>1,2</sup>, инженер, студент.

**Патрашин Александр Иванович**<sup>1</sup>, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

**Косых Валерий Петрович**<sup>3,4</sup>, заведующий лабораторией, доцент, к.т.н.

**Громили Геннадий Иванович**<sup>3</sup>, главный специалист.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (МФТИ).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

<sup>3</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет.

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2017 г.

### Исходные предпосылки и конечные результаты

На момент написания данной статьи опубликованы следующие основные работы по оценке параметров сканирующего ФПУ в зависимости от структуры топологии МФЧЭ и параметров ФЧЭ: в работе [6] приведены результаты сравнения двух топологий сканирующей ПЗС-матрицы с точки зрения пространственного разрешения, оцениваемого по тестовым мирам; в [7, 8] исследуется отношение сигнал/шум на выходе сканирующего ИК ФПУ, работающего в VLIP-режиме, в зависимости от размеров ФЧЭ. Результаты и выводы текущей статьи не противоречат результатам и выводам, приведенным в указанных работах, а область применимости предложенного в статье метода существенно шире. Метод позволяет оценить отношение сигнал/шум и пространственное разрешение на выходе изделия с учетом параметров оптической системы (ОС), распределения чувствительности ФЧЭ, параметров дискретизации, ВЗН-суммирования и накопления, значений дробового шума и шума считывания, согласованного суммирования выходных сигналов ИК ФПУ. С помощью предложенного метода были найдены оптимальные размеры ФЧЭ (обеспечивающие максимальное отношение сигнал/шум, пространственное разрешение системы при этом не учитывалось) при регистрации пятна излучения в плоскости МФЧЭ, расположенного в максимуме/минимуме пеленгационной характеристики, причем с учетом/без учета шума считывания, с учетом/без учета дополнительной пространственной обработки выходных сигналов.

В рамках данной будем считать, что все ФЧЭ матрицы работают в одном спектральном диапазоне. Результаты работы могут быть применены и для многоспектральных ИК ФПУ при рассмотрении групп ФЧЭ каждого спектрального диапазона по-отдельности.

### Описание метода и расчет параметров

Основными параметрами, характеризующими способность ОЭС осуществлять регистрацию МО, являются отношение сигнал/шум (или сигнал/помеха) и пространственное разрешение.

Отношение сигнал/шум (обозначаемое в дальнейшем  $SNR$  – signal to noise ratio) во многом определяет вероятность обнаружения цели и частоту ложных тревог на выходе решающего устройства. Максимально достижимое значение  $SNR$  на выходе линейной системы обнаружения при заданных параметрах цели и фона обеспечивает согласованный фильтр (СФ) [9]. Распространенной практикой оценки пороговых характеристик систем регистрации является сравнение реального  $SNR$  на выходе исследуемой системы и  $SNR_{СФ}$  – отношения сигнал/шум на выходе соответствующего СФ, а именно,  $k = SNR/SNR_{СФ}$ . В работе будем использовать данный метод оценки. Получим аналитические выражения и проведем расчет значений  $SNR$  в зависимости от параметров топологии МФЧЭ.

В качестве входного сигнала будем рассматривать МО, неподвижный относительно ИК ФПУ и объектива (движение изображения МО в фокальной плоскости осуществляется за счет линейного движения зеркала сканера). Функцию рассеяния точки (ФРТ) оптической системы (ОС), которая включает объектив, входные окна и светофильтры ИК ФПУ, будем считать распределенной по Гауссу:

$$PSF_{ОС}(x, y) = \frac{1}{2\pi R^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2R^2}\right), \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты точки в фокальной плоскости ОС,  $R$  – параметр распределения. Пусть радиус пятна  $r$  по уровню 0,8 функции концентрации энергии равен 15 мкм. Найдем максимальное отношение сигнал/шум на выходе СФ  $SNR_{СФ}$ , считая, что система сканирования отсутствует, т. е. изображение МО в фокальной плоскости ОС также неподвижно и описывается выражением

$$u_{вх}(x, y, t) = W_0 \times PSF_{ОС}(x, y), \quad (2)$$

где  $W_0$  [фотон/с] – полное количество фотонов в пятне излучения за единицу времени. Пусть максимальное значение  $SNR$  на выходе СФ достигается в  $(x_0, y_0, t_0) = (0, 0, 0)$ , т. е. к моменту времени  $t = 0$  электронная схема заканчивает обработку входного сигнала. Тогда сигнал на выходе СФ  $u_{сф\_вых}(0, 0, 0)$  может быть получен из (3), а шум  $D_{сф\_вых}$  – из (4).

$$u_{сф\_вых}(x, y, 0) = \tilde{u}_{сф\_вых}(x, y) \times T_{СФ} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_0 A_0 \exp\left(-R^2(\omega_x^2 + \omega_y^2)\right) \times \exp(j(\omega_x x + \omega_y y)) d\omega_x d\omega_y T_{СФ} = \frac{A_0 W_0 T_{СФ}}{4\pi R^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4R^2}\right), \quad (3)$$

$$D_{сф\_вых} = \frac{\Phi_{вх} T_{СФ}}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A_0^2 \exp\left(-R^2(\omega_x^2 + \omega_y^2)\right) d\omega_x d\omega_y = \frac{\Phi_{вх} A_0^2 T_{ОФ}}{4\pi R^2} \quad (4)$$

где  $A_0$  – произвольная константа;  $\Phi_{\text{вх}}$  [фотон<sup>2</sup>/(см<sup>2</sup> с)] – спектральная плотность мощности шума на входе фильтра (считаем шум белым);  $T_{\text{сф}}$  – время работы фильтра. Отношение сигнал шум  $SNR_{\text{сф}}$  на выходе фильтра равно

$$SNR_{\text{сф}} = \frac{W_0}{2R} \sqrt{\frac{T_{\text{оф}}}{\pi \times \Phi_{\text{вх}}}}. \quad (5)$$

В дальнейшем расчеты будем производить для двух моделей ФЧЭ, описываемых последовательно соотношениями (6) и (7):

$$PSF_{\text{ФЧЭ1}}(x, y) = \text{rect}(x/a) \times \text{rect}(y/b), \quad (6)$$

$$PSF_{\text{ФЧЭ2}}(x, y) = \exp\left(\frac{-x^2}{2A^2}\right) \exp\left(\frac{-y^2}{2B^2}\right), \quad (7)$$

где  $A$  и  $B$  – параметры, характеризующие размеры ФЧЭ по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

В рамках первой модели (6) чувствительность ФЧЭ (в дальнейшем ФЧЭ<sub>1</sub>) распределена равно-

$$u_{\text{вых1}}(x, y, 0) = \tilde{u}_{\text{вых1}}(x, y) T_{\text{нак}} \eta_1 = \frac{A_0 W_0 T_{\text{нак}} \eta_1}{4} \left[ \text{Erf}\left(\frac{a-2x}{2\sqrt{2}R}\right) + \text{Erf}\left(\frac{a+2x}{2\sqrt{2}R}\right) \right] \times \left[ \text{Erf}\left(\frac{b-2y}{2\sqrt{2}R}\right) + \text{Erf}\left(\frac{b+2y}{2\sqrt{2}R}\right) \right] \quad (8)$$

$$D_{\text{вых1}} = \Phi_{\text{вх}} ab T_{\text{нак}} A_0^2 \eta_1. \quad (9)$$

Аналогично для ФЧЭ<sub>2</sub>:

$$u_{\text{вых2}}(x, y, 0) = \tilde{u}_{\text{вых2}}(x, y) T_{\text{нак}} \eta_2 = \frac{A_0 W_0 AB T_{\text{нак}} \eta_2}{4\pi^2 \sqrt{A^2 + R^2} \sqrt{B^2 + R^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2(A^2 + R^2)}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2(B^2 + R^2)}\right) \quad (10)$$

$$D_{\text{вых2}} = \frac{A_0^2 AB \Phi_{\text{вх}} T_{\text{нак}} \eta_2}{16\pi^3}. \quad (11)$$

Добавим в систему линейное оптико-механическое сканирование со скоростью  $v_{\text{ск}}$  в фокальной плоскости. Параметр  $v_{\text{ск}}$  будем считать заданным для разработчика ИК ФПУ (со стороны разработчика оптико-электронного комплекса) и равным  $v_{\text{ск}} = 58,8$  мм/с, что автоматически огра-

мерно внутри прямоугольника со сторонами  $a$ ,  $b$  и равна нулю вне данного прямоугольника. Такое приближенное описание ФЧЭ является наиболее распространенным и является в большинстве случаев достаточным для оценки характеристик. В рамках второй модели (7) будем считать, что распределение чувствительности ФЧЭ (в дальнейшем ФЧЭ<sub>2</sub>) описывает двумерная функция Гаусса. Примечательно выражение (7) тем, что оно с большей точностью, чем выражение (6), описывает реальное распределение чувствительности фотодиодов, изготовленных по планарной технологии. Также при  $A = B = R$  импульсная характеристика (7) переходит в характеристику (1), соответствующую СФ для МО.

Сигнал и шум от МО на выходе фильтра, состоящего из ФЧЭ<sub>1</sub> и интегратора с импульсной характеристикой  $\text{rect}(t/T_{\text{нак}})$ , где  $T_{\text{нак}}$  – время накопления фототока, вычисляются по формулам (8) и (9). Квантовую эффективность в максимуме чувствительности ФЧЭ обозначим  $\eta_1$  и  $\eta_2$  соответственно.

ничивает максимальную длительность входного сигнала по заданному уровню. Тогда сигналы  $u_{\text{вых\_ск1}}$  и  $u_{\text{вых\_ск2}}$  на выходе систем с ФЧЭ<sub>1</sub> и ФЧЭ<sub>2</sub> в режиме сканирования, при начальном положении центра пятна излучения  $(x_0, y_0)$ , рассчитываются по формулам (12) и (13).

$$u_{\text{вых\_ск1}}(x_0, y_0) = \frac{A_0 W_0 \eta_1}{4} \left[ \text{Erf}\left(\frac{a-2x_0}{2\sqrt{2}R}\right) + \text{Erf}\left(\frac{a+2x_0}{2\sqrt{2}R}\right) \right] \times \left[ \int_0^{T_{\text{нак}}} \text{Erf}\left(\frac{b-2(y_0 + v_{\text{ск}}t)}{2\sqrt{2}R}\right) dt + \int_0^{T_{\text{нак}}} \text{Erf}\left(\frac{b+2(y_0 + v_{\text{ск}}t)}{2\sqrt{2}R}\right) dt \right] \quad (12)$$

$$u_{\text{вых\_ск2}}(x_0, y_0) = \frac{A_0 W_0 A B \eta_2}{4\pi \sqrt{2\pi} v_{\text{ск}} \sqrt{A^2 + R^2}} \exp\left(-\frac{x_0^2}{2(A^2 + R^2)}\right) \left[ \text{Erf}\left(\frac{y_0 + v_{\text{ск}} T_{\text{нак}}}{\sqrt{2}\sqrt{B^2 + R^2}}\right) - \text{Erf}\left(\frac{y_0}{\sqrt{2}\sqrt{B^2 + R^2}}\right) \right]. \quad (13)$$

Если считать, что ИК ФПУ работает в режиме ограничения фоновым излучением (т. н. ВЛР-режим), то при расчете суммарного шума на выходе системы можно ограничиться только фотонной компонентой, т. е. выражениями (9), (11). Однако данное предположение может привести к неверным выводам, причем особенно при малых временах накопления  $T_{\text{нак}}$ . Тогда необходимо учитывать дополнительную компоненту шума, не зависящую от  $T_{\text{нак}}$ , а именно, шум считывания  $D_{\text{счит}}$ , снижающий пороговые характеристики реальных ОЭС относительно аналогичных характеристик СФ.

Для оценки SNR с учетом шума считывания введем параметры  $D_{\text{счит1}} = A_0^2 \Phi_{\text{вх}} a_1 b_1 T_{\text{нак1}}$  и  $D_{\text{счит2}} = A_0^2 \Phi_{\text{вх}} A_2 B_2 T_{\text{нак1}} / (16\pi^3)$ , где  $a_1 = b_1 = 30$  мкм,  $A_2 = B_2 = R$  (напомним, что  $R = 8,36$  мкм соответствует захвату 80 % энергии в пятне излучения диаметром 30 мкм),  $T_{\text{нак1}} = 255$  мкс, т. е. будем рассматривать значения шума считывания, численно равные соответствующим значениям фотонного шума при указанных параметрах (при квантовой эффективности ФЧЭ, равной 1). С учетом  $D_{\text{счит}}$  перепишем выражения (9) и (11) следующим образом:

$$D_{\text{вых1}} = \Phi_{\text{вх}} a b T_{\text{нак}} A_0^2 \eta_1 + D_{\text{счит}}. \quad (14)$$

$$D_{\text{вых2}} = \frac{A_0^2 \Phi_{\text{вх}} T_{\text{нак}} \eta_2}{4\pi A B} + D_{\text{счит}}. \quad (15)$$

Значения SNR на выходе реального однорядного ФПУ ( $N_{\text{взн}} = 1$ , где  $N_{\text{взн}}$  – количество каскадов ВЗН) относительно согласованного фильтра обозначим как  $k_1 = u_{\text{вых\_ск1}} / (SNR_{\text{опт}} \sqrt{D_{\text{вых1}}})$  и  $k_2 = u_{\text{вых\_ск2}} / (SNR_{\text{опт}} \sqrt{D_{\text{вых2}}})$ . При необходимости оценки отношения сигнал/шум на выходе ФПУ с режимом ВЗН соответствующие значения коэффициентов  $k$  должны быть умножены на  $\sqrt{N_{\text{взн}}}$  [1–4] (в случае идеального ВЗН-суммирования).

Допустим, сетка отсчетов симметрична, и  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = v_{\text{ск}} \times T_{\text{нак}} = 15$  мкм. Пусть  $D_{\text{счит}} = 0$ . Введем параметры  $a_{\text{max}}$ ,  $b_{\text{max}}$  и  $A_{\text{max}}$ ,  $B_{\text{max}}$  – значения размеров ФЧЭ, при которых достигается максимум отношения сигнал/шум на выходе ИК ФПУ в точках максимума двумерной пеленгационной характеристики.

Построим зависимости  $k_1(a)$  и  $k_2(A)$  для точек  $(x_0, y_0) = (0, -y_{\text{выб}}/2)$  и  $(x_0, y_0) = (-x_{\text{выб}}/2, 0)$ , соответствующих максимуму ( $k_{\text{max}}$ ) и минимуму ( $k_{\text{min}}$ ) двумерной пеленгационной характеристики (см. рис. 1). Отметим, что максимум отношения сигнал/шум относительно СФ в максимуме пеленгационной характеристики достигается при  $a = a_{\text{max}} \approx 2 \times 1,4R$  (что совпадает с результатами [8]) и  $A = A_{\text{max}} = R$ . Добавление в систему шума считывания приводит к смещению максимумов зависимостей в сторону больших значений  $a$  и  $A$  (см. рис. 2).

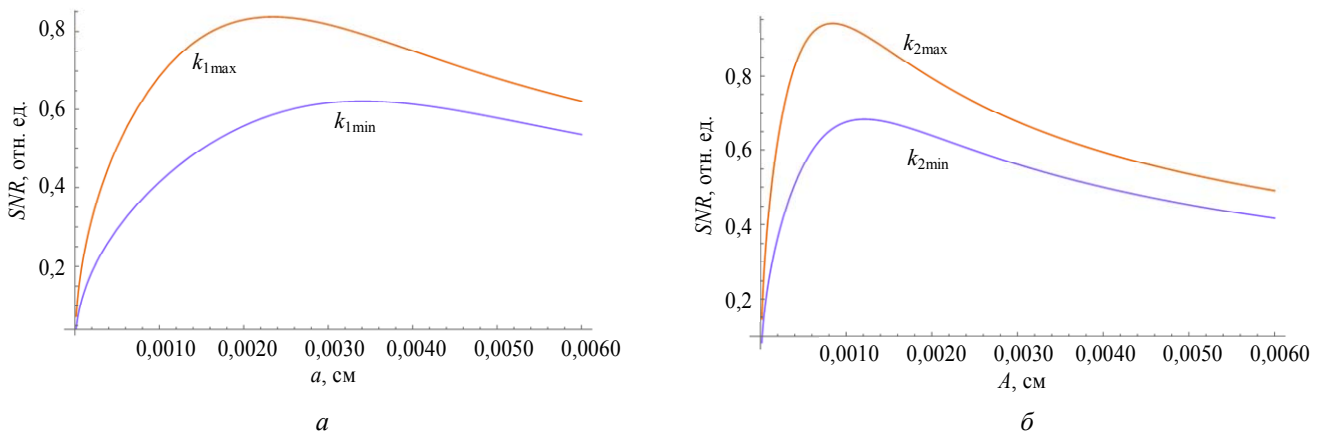


Рис. 1. Зависимости относительных значений SNR от размера ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) в направлении ОХ при  $T_{\text{оф}} = T_{\text{нак}}$ ,  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7R$ ,  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R$ ,  $D_{\text{счит}} = 0$ .

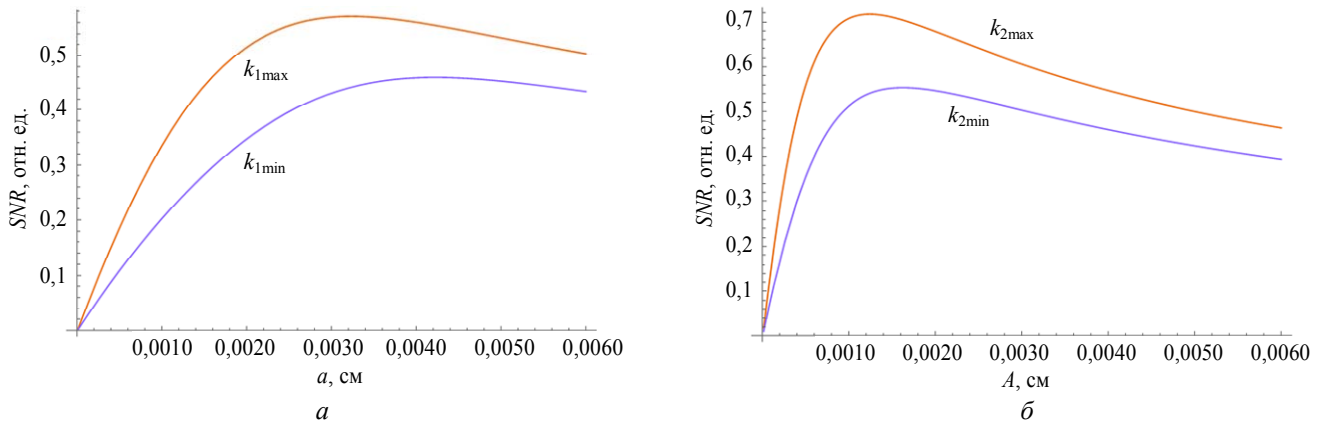


Рис. 2. Зависимости относительных значений SNR от размера ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) в направлении ОХ при  $T_{\text{оф}} = T_{\text{нак}}$ ,  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7R$ ,  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R$ ,  $D_{\text{чит}} = D_{\text{чит1}}$  (а) и  $D_{\text{чит}} = D_{\text{чит2}}$  (б).

Построим зависимости  $k_1(b)$  и  $k_2(B)$  для максимума и минимума двумерной пеленгационной характеристики при  $D_{\text{чит}} = 0$  (см. рис. 3). Отметим, что максимум отношения сигнал/шум относитель-

но СФ в максимуме пеленгационной характеристики достигается при  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7R = 28,4$  мкм (что совпадает с результатами [8]) и  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R = 19$  мкм.

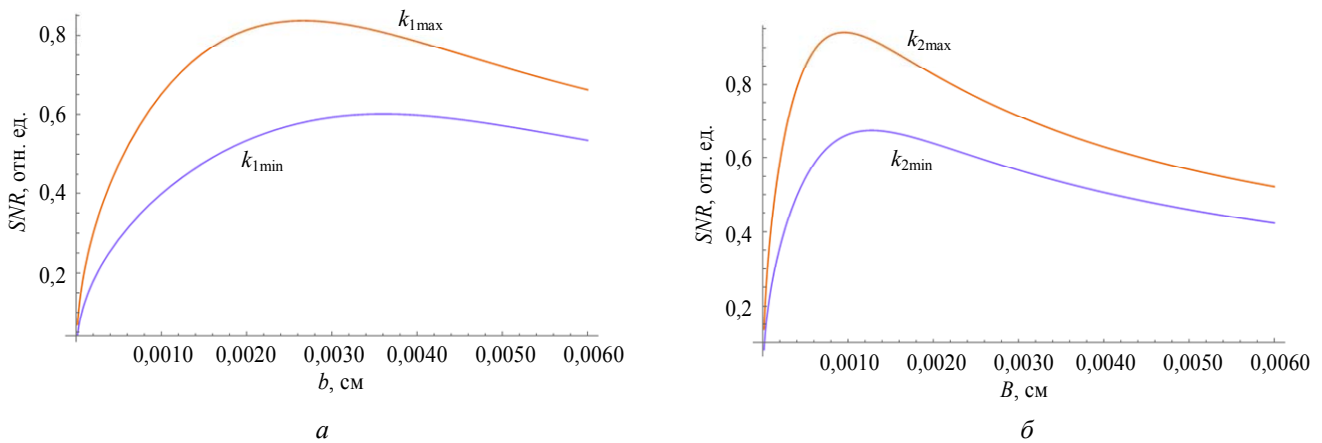


Рис. 3. Зависимости относительных значений SNR от размера ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) в направлении ОУ при  $T_{\text{оф}} = T_{\text{нак}}$ ,  $a = a_{\text{max}} \approx 2 \times 1,4R$ ,  $A = A_{\text{max}} = R$ ,  $D_{\text{чит}} = 0$ .

Пусть  $T_{\text{нак}} = T_{\text{сф}}$ ;  $a = a_{\text{max}} \approx 2 \times 1,4R$ ;  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7R$ ;  $A = A_{\text{max}} = R$ ;  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R$ ,  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}}$ . Значения  $k_1(y_{\text{выб}})$  и  $k_2(y_{\text{выб}})$  для максимума ( $k_{1\text{max}}$ ,  $k_{2\text{max}}$ ) и минимума ( $k_{1\text{min}}$ ,  $k_{2\text{min}}$ ) пеленгационной характеристики представлены на рис. 4 при  $D_{\text{чит}} = 0$ , а на рис. 5 – при  $D_{\text{чит}} \neq 0$ . При уменьшении  $y_{\text{выб}}$  уменьшаются  $T_{\text{нак}}$  и  $T_{\text{сф}}$  (т. к.  $v_{\text{ск}}$  фиксирована), и сканирующее ИК ФПУ «вырождается» в ФПУ смотрящего типа. Данные характеристики показывают максимальное отношение сигнал/шум, которое может быть получено на выходе сканирующей системы с одним ФЧЭ и временем накопления  $T_{\text{нак}}$  по отношению к согласованному фильтру, работающему то же время  $T_{\text{сф}} = T_{\text{нак}}$ , в зависимости от пространственного периода выборки. Отметим, что при  $D_{\text{чит}} = 0$  увеличение частоты выборок приводит к улучшению

результата, а именно, приближению параметров фильтра к согласованному (при равных временах работы СФ и интегрирования фототока накопительной ячейкой), что не наблюдается на практике из-за наличия шума считывания. Это ясно демонстрируют характеристики на рис. 5.

Построим зависимости, аналогичные приведенным на рис. 4, 5 (при аналогичных значениях  $a$ ,  $b$ ,  $A$ ,  $B$ ), но при фиксированном времени работы СФ  $T_{\text{сф}} = 255$  мкс (напомним, что  $v_{\text{ск}} = 58,8$  мм/с) и переменном  $T_{\text{нак}}$  (что может привести к значениям  $k_i$ , превышающим 1). Данные зависимости могут быть использованы при прогнозировании пороговых характеристик сканирующего ИК ФПУ, работающего в VLIP-режиме (см. рис. 6) и с учетом шума считывания (см. рис. 7).



Рис. 4. Зависимости относительных значений SNR от периода выборки для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $T_{нак} = T_{сф}$ ,  $D_{счит} = 0$ .

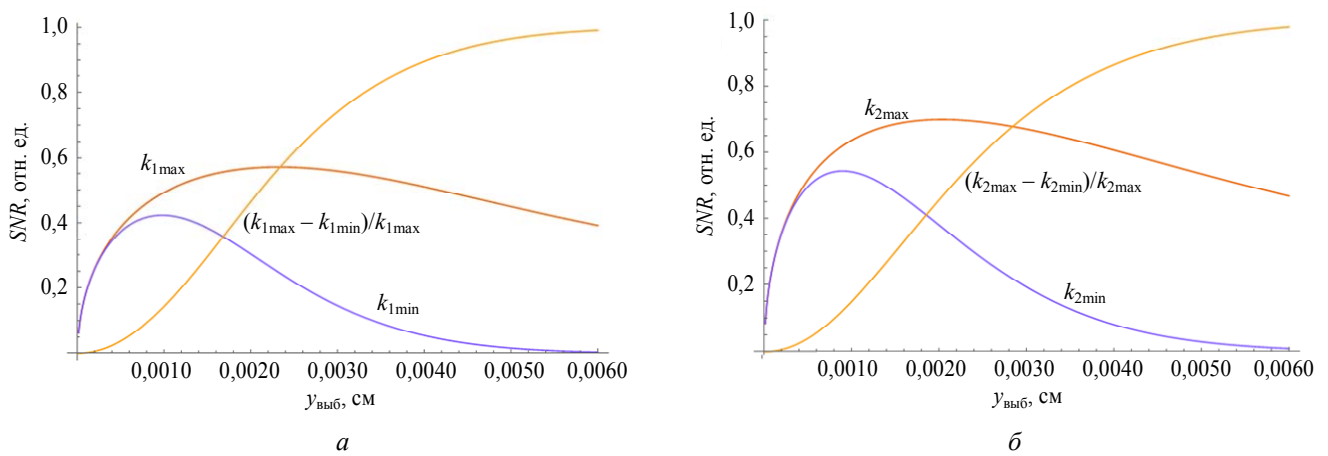


Рис. 5. Зависимости относительных значений SNR от периода выборки для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $T_{нак} = T_{сф}$ ,  $D_{счит} = D_{счит1}$  (а) и  $D_{счит} = D_{счит2}$  (б).

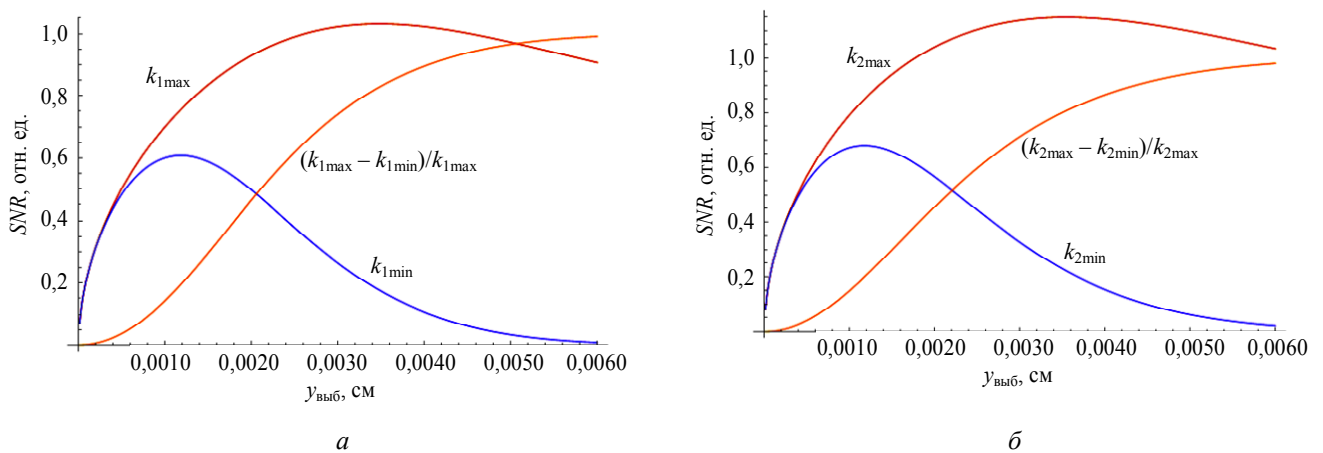


Рис. 6. Зависимости относительных значений SNR от периода выборки для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $T_{сф} = 255$  мкс,  $T_{нак}$  в общем случае отлично от  $T_{сф}$ ,  $D_{счит} = 0$ .

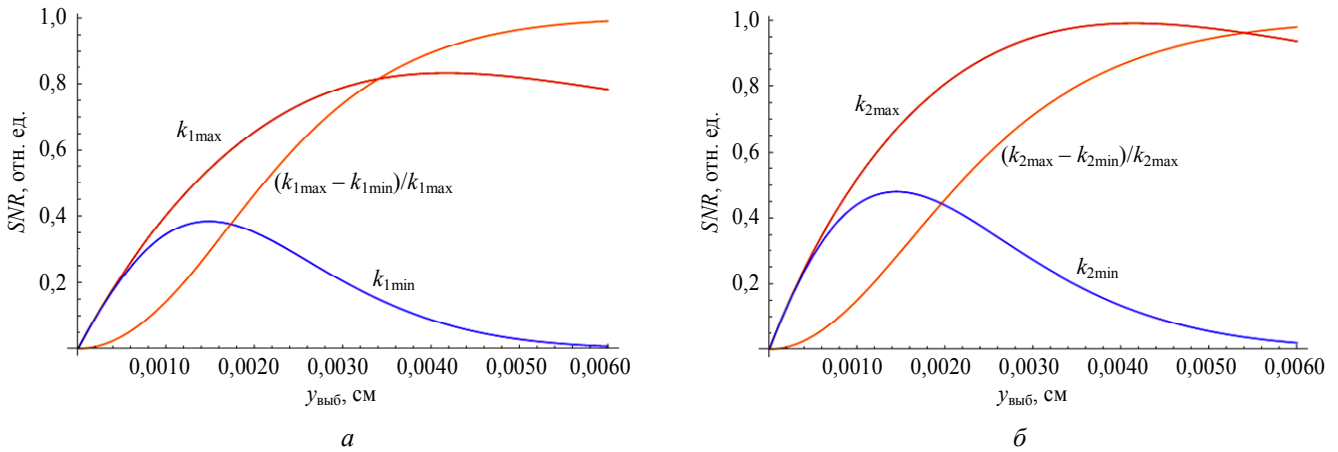


Рис. 7. Зависимости относительных значений SNR от периода выборки для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при T<sub>СФ</sub> = 255 мкс, T<sub>нак</sub> в общем случае отлично от T<sub>СФ</sub>, D<sub>счит</sub> = D<sub>счит1</sub> (а) и D<sub>счит</sub> = D<sub>счит2</sub> (б).

Дополнительное повышение отношения сигнал/шум на выходе ОЭС часто достигается за счет цифровой обработки сигналов. Пусть ИК ФПУ осуществляет пространственную дискретизацию входного распределения интенсивности с периодами  $x_{\text{выб}}$  и  $y_{\text{выб}}$  в плоскости фотослоя. Если в прямоугольнике размером  $X \times Y$  [мкм<sup>2</sup>], центр которого совмещен с центром пятна излучения (в плоскости фотослоя), содержится основная значимая информация о пятне излучения, то можно считать, что информация о пятне содержится в массиве данных размером  $M \times K$ , причем  $M = X/x_{\text{выб}}$  и  $K = Y/y_{\text{выб}}$ . Выражение для расчета отношения сигнал/шум  $SNR_{\text{цф}}$  на выходе согласованного цифрового филь-

тра (для случая некоррелированного шума) [10] приведено ниже:

$$SNR_{\text{цф}} = \sqrt{\frac{\sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{k=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} |u_{\text{вх}}(m, k)|^2}{D_{\text{вх}}}}, \quad (16)$$

где  $M, K$  – нечетные; считаем, что значения шума на входе фильтра  $D_{\text{вх}}(m, k)$  для каждого из отсчетов  $m, k$  равны  $D_{\text{вх}}$ . Тогда отношение сигнал/шум на выходе сканирующей ОЭС с режимом ВЗН и согласованной цифровой фильтрацией на выходе определяется выражением:

$$SNR_{\text{ОЭС}}(x_0, y_0) = \sqrt{N_{\text{ВЗН}} \frac{\sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{k=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} |u_{\text{ВЫХ\_СКИ}}(x_0 + m \times x_{\text{выб}}, y_0 + k \times y_{\text{выб}})|^2}{\Phi_{\text{ВХ}} \times T_{\text{НАК}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [A_0 \text{PSF}_{\text{ФЧЭ}_i}(x, y)]^2 dx dy}}, \quad (17)$$

где  $i = 1, 2$  определяет тип ФЧЭ, координаты  $(x_0, y_0)$  определяют относительное положение «сетки» отсчетов (точек дискретизации) относительно центра пятна. При получении выражения (16) считалось, что значения  $x_0, y_0$  являются заранее известными, что позволяет корректно настроить весовые коэффициенты цифрового фильтра и получить максимальное увеличение SNR от процедуры обработки. Следует также отметить существенную деталь: правая часть выражения (17) с точностью до постоянного (по отношению к параметрам  $x_0$  и  $y_0$ ) множителя является средним квадратичным значением выборок сигналов после процедуры свертки, что означает слабую зависимость  $SNR_{\text{ОЭС}}(x_0, y_0)$  от положения «сетки» отсчетов при достаточной частоте выборок (понятие «достаточ-

ности» раскрыт ниже). Например, в случае ФЧЭ<sub>1</sub> при  $a = b = 30$  мкм и  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = 15$  мкм,  $SNR_{\text{ОЭС}}$  в максимуме двумерной пеленгационной характеристики ( $x_0 = 0$  мкм,  $y_0 = -7,5$  мкм) отличается от  $SNR_{\text{ОЭС}}$  в минимуме двумерной пеленгационной характеристики ( $x_0 = -7,5$  мкм,  $y_0 = 0$  мкм) менее чем на 1,5 % (в то время как соответствующие коэффициенты  $k_{1\text{max}}$  и  $k_{1\text{min}}$  отличаются на 23 %).

В дальнейшем при оценке SNR ОЭС с цифровым фильтром будем использовать параметр  $k_{\text{цф}}(x_0, y_0) = SNR_{\text{ОЭС}}(x_0, y_0) / SNR_{\text{СФ}}$ . При этом  $k_{\text{цф}}$ , как правило, будет превышать 1, что объясняется тем, что  $SNR_{\text{СФ}}$  рассчитывается на выходе СФ, состоящего из одного ФЧЭ и интегратора (см. выражение 5), т. е. без учета процедуры ВЗН-суммирования и цифровой обработки.

Теперь повторим те исследования, которые проводились для однорядного ИК ФПУ, и результаты которых представлены на рис. 1–7, но теперь уже с учетом цифровой фильтрации выходных сигналов. Будем также считать, что  $N_{\text{взн}} = 1$ ,  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}}$ .

Зависимости  $k_{\text{цф}}(a)$  и  $k_{\text{цф}}(A)$  для точек минимума и максимума пеленгационной характеристики приведены на рис. 8 (при  $T_{\text{СФ}} = T_{\text{нак}}$ ,  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7 \times R$ ,  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R$ ,  $D_{\text{счит}} = 0$ ). Зависимости  $k_{\text{цф}}(b)$  и  $k_{\text{цф}}(B)$  для точек минимума и максимума пеленгационной характеристики приведены на рис. 9 (при  $T_{\text{СФ}} = T_{\text{нак}}$ ,  $a = a_{\text{max}} \approx 2 \times 1,4R$ ,  $A = A_{\text{max}} = R$ ,  $D_{\text{счит}} = 0$ ). Следует отметить отсутствие явного максимума характеристик на рис. 8, 9, что объясняется не фиксированными размерами

ядра согласованного фильтра. При расчетах учитывались все значимые отсчеты сигналов ИК ФПУ, что означает увеличение сигнала на выходе цифрового фильтра при увеличении размера ФЧЭ (количество отсчетов при фиксированных периодах пространственных выборок увеличивается).

Характеристики на рис. 8–9 показывают, что увеличение размеров ФЧЭ ОЭС, в которой предусмотрено согласованное суммирование выходных сигналов ИК ФПУ, в условиях некоррелированного шума, при работе в режиме ВЛIP оправдано с точки зрения повышения  $SNR$  вплоть до значений  $a \approx b \approx 6R \approx 50$  мкм и  $2A \approx 2B \approx 4,8R \approx 40$  мкм (при  $y_{\text{выб}} \approx 1,8 \times R \approx 15$  мкм). Полученные значения существенно превышают размеры ФЧЭ, соответствующие максимальным значениям  $SNR$  на рис. 1–3.

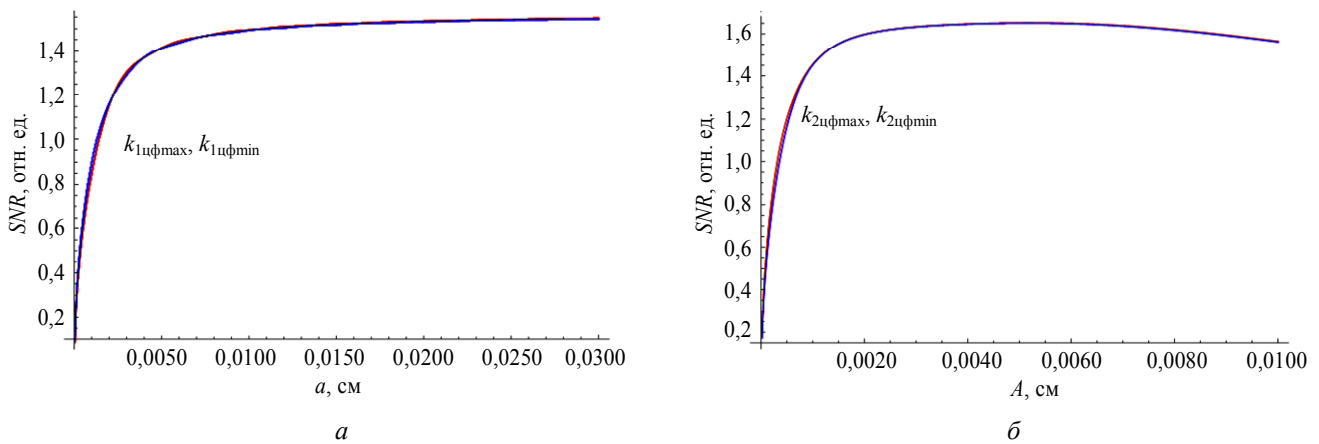


Рис. 8. Зависимости относительных значений  $SNR$  от размера ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) в направлении ОХ с учетом цифровой обработки при  $T_{\text{СФ}} = T_{\text{нак}}$ ,  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7 \times R$ ,  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R$ ,  $D_{\text{счит}} = 0$ .

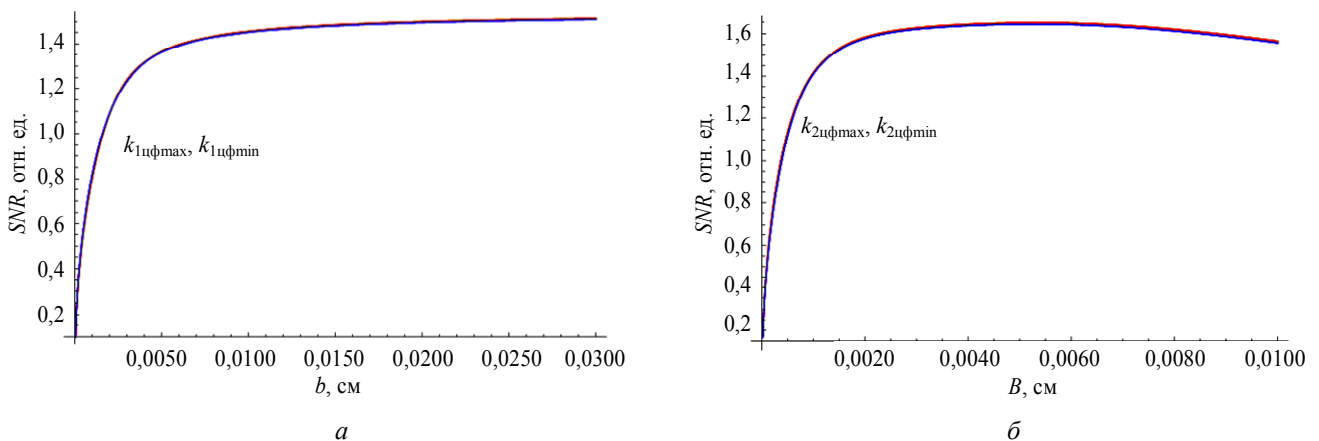


Рис. 9. Зависимости относительных значений  $SNR$  от размера ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) в направлении ОУ с учетом цифровой обработки при  $T_{\text{СФ}} = T_{\text{нак}}$ ,  $a = a_{\text{max}} \approx 2 \times 1,4R$ ,  $A = A_{\text{max}} = R$ ,  $D_{\text{счит}} = 0$ .

Пусть  $T_{\text{нак}} = T_{\text{СФ}}$ ;  $a = a_{\text{max}} \approx 2 \times 1,4 \times R$ ;  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7 \times R$ ;  $A = A_{\text{max}} = R$ ;  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136 \times R$ . Значения  $k_{\text{цф}}(y_{\text{выб}})$  для максимума и минимума пеленгационной характеристики, с учетом цифровой обработки, представлены на рис. 10 при  $D_{\text{счит}} = 0$  и

на рис. 11 – при  $D_{\text{счит}} \neq 0$ . Таким образом, существует значение  $y_{\text{выб}}^*$  (в рассматриваемом случае  $y_{\text{выб}}^* \approx 1,8R$ ) такое, что при  $y_{\text{выб}} < y_{\text{выб}}^*$  значения  $k_{\text{цф}}$  для максимума ( $k_{\text{цфmax}}$ ) и для минимума ( $k_{\text{цфmin}}$ ) пеленгационной характеристики практически рав-

ны при известных априори значениях  $x_0$  и  $y_0$ , на что уже было указано ранее. Примечательно, что при  $y_{\text{выб}} > y_{\text{выб}}^*$  значения  $k_{\text{цифmax}}$  расположены ниже соответствующих значений  $k_{\text{цифmin}}$ , что объясняет согласованность пространственного фильтра и

сетки выборок сигналов МО. Следует также отметить, что наличие пространственной фильтрации приводит к возрастанию значений  $SNR$  при увеличении частоты выборок и при наличии шума считывания (см. рис. 11), для сравнения см. рис. 5.

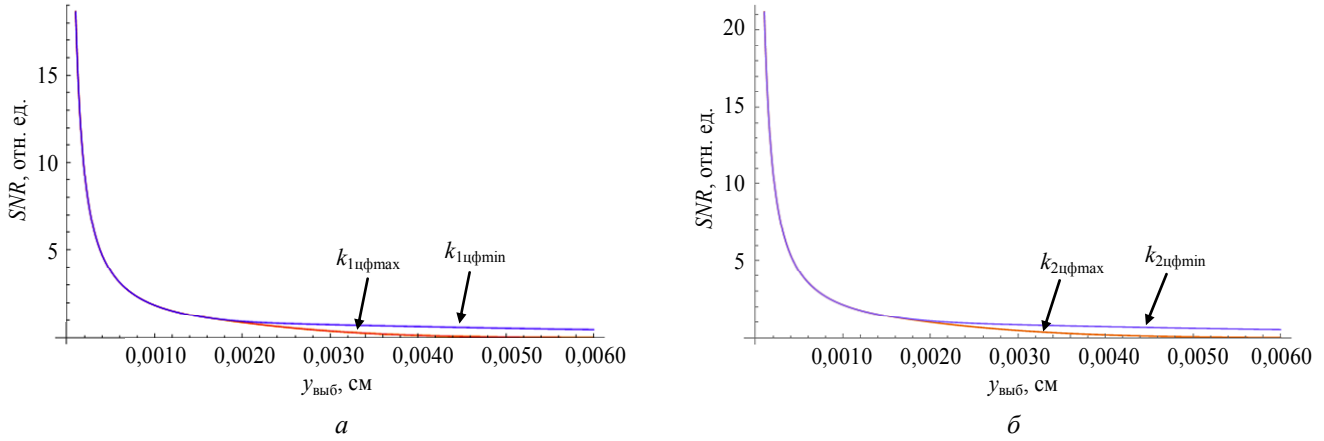


Рис. 10. Зависимости относительного значения SNR от периода выборки для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $T_{\text{нак}} = T_{\text{сф}}$ ,  $D_{\text{счит}} = 0$ .

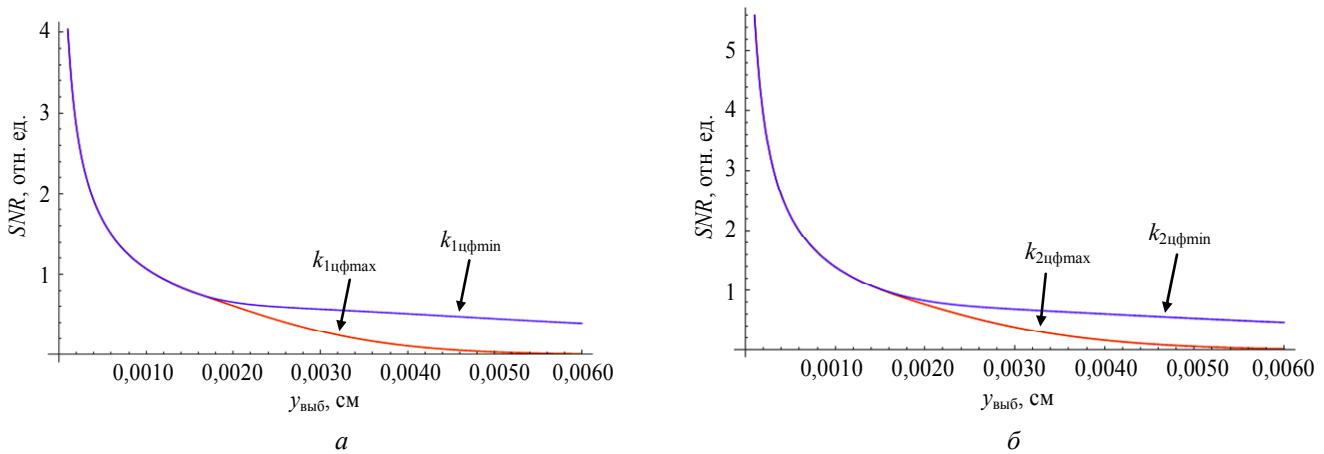


Рис. 11. Зависимости относительного значения SNR от периода выборки для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $T_{\text{нак}} = T_{\text{сф}}$ ,  $D_{\text{счит}} = D_{\text{счит}1}$  (а) и  $D_{\text{счит}} = D_{\text{счит}2}$  (б).

Перейдем к вопросу оценки пространственного разрешения. Характеристикой линейной ОЭС как фильтра пространственных частот является функция передачи  $TF$  (transfer function) [11], часто называемая «оптической передаточной функцией» или ОПФ. Модуль данной функции называется функцией передачи модуляции (или  $MTF$  – modulation transfer function). Как  $TF$ , так и  $MTF$  во многом определяются топологией МФЧЭ ИК ФПУ. Рассмотрим идеальную ОЭС, в которой ВЗН-суммирование, а также электронный тракт ИК ФПУ не влияют на нормированную функцию передачи модуляции системы  $MTF_{\text{ОЭС}}(\omega_x, \omega_y)$ . Тогда можно записать выражение:

$$MTF_{\text{ОЭС}i} = (MTF_{\text{ОС}} \times MTF_{\text{ФЧЭ}i} \times MTF_{\text{скан}}) \times MTF_{\text{циф}} = MTF_i \times MTF_{\text{циф}}, \quad (18)$$

где  $MTF_{\text{ОС}}$ ,  $MTF_{\text{ФЧЭ}}$ ,  $MTF_{\text{скан}}$ ,  $MTF_{\text{циф}}$  – модуляционные передаточные функции оптической системы, ФЧЭ, процесса сканирования и цифрового фильтра соответственно,  $i = 1, 2$  определяет тип ФЧЭ. Следует отметить, что выражение (18) позволяет рассчитать максимальное относительное значение контраста на выходе «линейной» ОЭС на пространственных частотах  $\omega_x$  и  $\omega_y$ . В данном случае имеется в виду линейность ОС, процессов фотоэлектрического преобразования падающего излучения, линейность электронного тракта ИК ФПУ и цифровых методов обработки выходных сигналов. В общем смысле многоэлементное ИК ФПУ линейным устройством не является из-за процедуры пространственной дискретизации, что приводит к зависимости контраста на выходе ОЭС от фазы входного гармонического сигнала.

Выражения для расчета  $MTF_1$  и  $MTF_2$  для ФЧЭ<sub>1</sub> и ФЧЭ<sub>2</sub> соответственно приведены ниже.

$$MTF_1(\omega_x, \omega_y) = 2\pi R^2 ab v_{\text{СК}} T_{\text{НАК}} \left| \text{sinc}\left(\frac{\omega_x a}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{\omega_y b}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{\omega_y v_{\text{СК}} T_{\text{НАК}}}{2}\right) \right| \exp\left(-\frac{R^2(\omega_x^2 + \omega_y^2)}{2}\right). \quad (19)$$

$$MTF_2(\omega_x, \omega_y) = 4\pi^2 R^2 AB v_{\text{СК}} T_{\text{НАК}} \exp\left(-\frac{A^2\omega_x^2 + B^2\omega_y^2}{2}\right) \left| \text{sinc}\left(\frac{\omega_y v_{\text{СК}} T_{\text{НАК}}}{2}\right) \right| \exp\left(-\frac{R^2(\omega_x^2 + \omega_y^2)}{2}\right). \quad (20)$$

$MTF_{\text{цф}}$  рассчитывается по формуле

$$MTF_{\text{цф}}(\omega_x, \omega_y) = \left| \iint_{R^2} \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{k=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \sigma_{m,k} \delta(x - (x_0 + mx_{\text{выб}}), y - (y_0 + ky_{\text{выб}})) \exp(-j(\omega_x x + \omega_y y)) dx dy \right| = \quad (21)$$

$$= \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{k=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} u_{\text{выб\_ск}i}(x_0 + m \times x_{\text{выб}}, y_0 + k \times y_{\text{выб}}, T_{\text{НАК}}) \cos(\omega_x(x_0 + mx_{\text{выб}}) + \omega_y(y_0 + ky_{\text{выб}})).$$

Т. к. в данной работе рассматриваются ОЭС, осуществляющие регистрацию МО, введем дополнительный параметр  $\Delta r_{0,2}$ , т. е. минимальное расстояние между двумя МО (в плоскости МФЧЭ), при котором обеспечивается значение контраста на выходе ОЭС не ниже 0,2. Используя (12) и (13), запишем выражение для расчета сигнала от двух МО, расположенных на расстоянии  $\Delta r$  ( $\Delta r_x$  и  $\Delta r_y$  вдоль координат ОХ и ОУ соответственно), в виде следующей формулы:

$$U_{\text{выб\_ск}i}(x, y) = u_{\text{выб\_ск}i}(x, y) + u_{\text{выб\_ск}i}(x + \Delta r_x, y + \Delta r_y). \quad (22)$$

Значение контраста  $\gamma_i$  для случая ФЧЭ<sub>i</sub> на выходе ИК ФПУ рассчитывается Следующим образом:

$$\gamma_i(\Delta r_x, \Delta r_y) = \frac{\text{Max}[U_{\text{выб\_ск}i}] - \text{Min}[U_{\text{выб\_ск}i}]}{\text{Max}[U_{\text{выб\_ск}i}] + \text{Min}[U_{\text{выб\_ск}i}]} \quad (23)$$

Оценим пространственное разрешение ОЭС, не содержащей цифрового фильтра, в зависимости от размеров ФЧЭ при  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = 15 \mu\text{м}$  (рис. 12, 13).

Значения  $MTF_1(0, \omega_y)$  и  $MTF_2(0, \omega_y)$  для различных размеров ФЧЭ приведены на рис. 14.

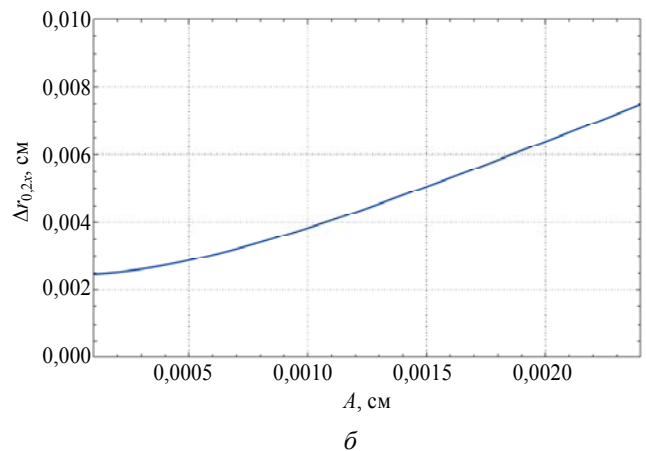
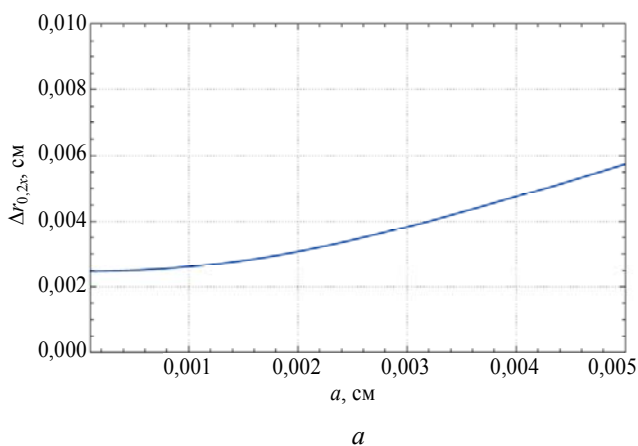


Рис. 12. Зависимости разрешающей способности ОЭС по МО в направлении ОХ для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $b = b_{\text{max}} \approx 2 \times 1,7R$ ,  $2B = 2B_{\text{max}} \approx 2 \times 1,136R$ .

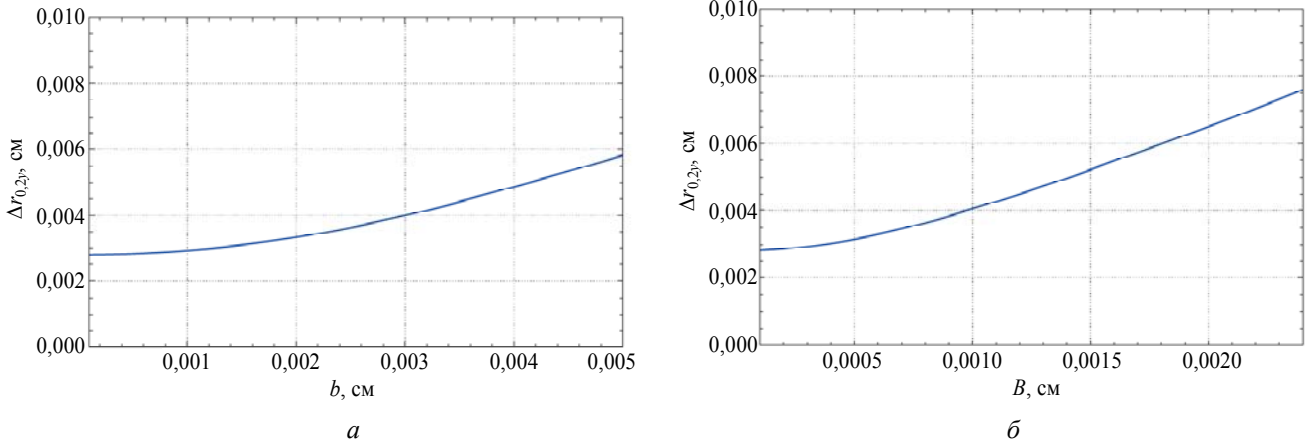


Рис. 13. Зависимости разрешающей способности ОЭС по МО в направлении ОУ для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $a = a_{max} \approx 2 \times 1,4R$ ,  $A = A_{max} = R$ .

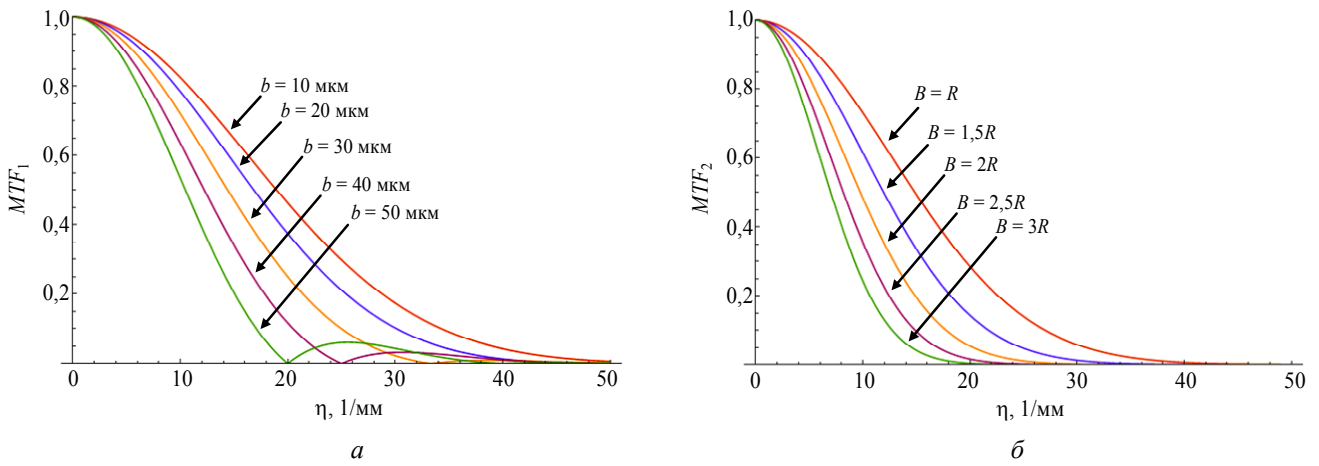


Рис. 14. Функции передачи модуляции ОЭС без цифровой обработки, в направлении ОУ, для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $a = a_{max} \approx 2 \times 1,4R$ ,  $A = A_{max} = R$ .

Добавление в ОЭС согласованного цифрового фильтра, как было показано ранее, приводит к увеличению отношения сигнал шум на выходе си-

стемы. Однако процедура согласованной фильтрации приводит к ухудшению пространственного разрешения (см. рис. 15).

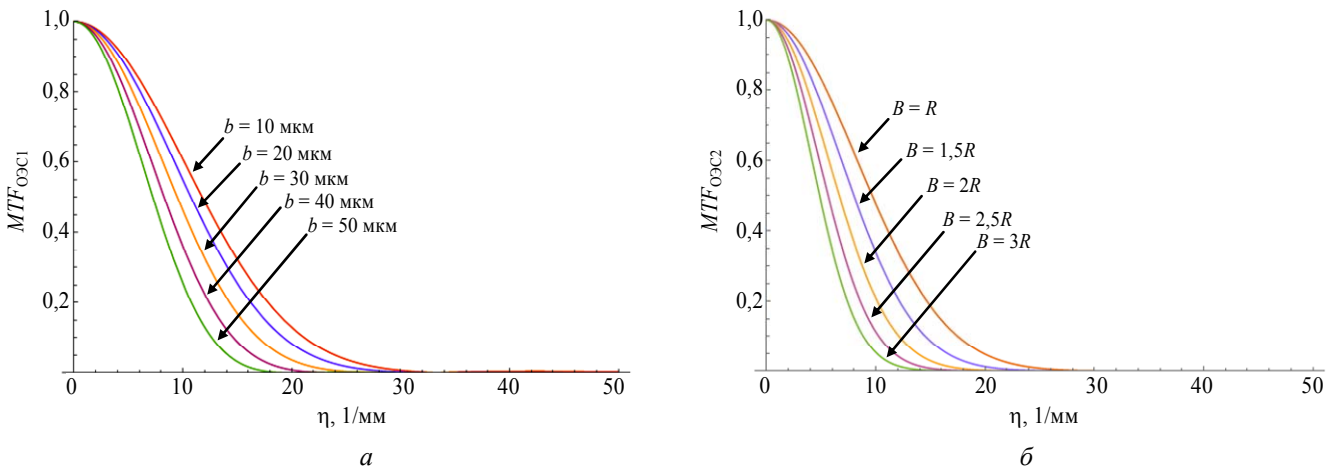


Рис. 15. Функции передачи модуляции ОЭС с цифровой обработкой, в направлении ОУ, для ФЧЭ<sub>1</sub> (а) и ФЧЭ<sub>2</sub> (б) при  $a = a_{max} \approx 2 \times 1,4R$ ,  $A = A_{max} = R$ .

**Пример использования метода**

Допустим, необходимо зарегистрировать МО, изображение которого в плоскости МФЧЭ распределено в соответствии с (1), где радиус пятна  $r$  по уровню 0,8 функции концентрации энергии равен 15 мкм. Поток излучения в максимуме распределения энергии пятна  $I_0$  равен  $5 \cdot 10^{12}$  фотон/(с см<sup>2</sup>). Будем рассматривать ФЧЭ типа 1 с квантовой эффективностью  $\eta_1 = 0,5$ . Пусть на вход ФПУ подается белый шум со спектральной плотностью

мощности  $\Phi_{вх}(\omega_x, \omega_y, \omega_t) = 2 \times 10^{12}$  фотон<sup>2</sup>/(см<sup>2</sup> с). Будем считать, что  $\Phi_{вх}$  характеризует дробовой шум ФЧЭ, приведенный ко входу ИК ФПУ. Пусть шум считывания  $D_{счит} = (70 \times e)^2$ , и ИК ФПУ функционирует не в VLIP-режиме. Под термином «шум считывания» будем понимать результат сложения всех шумов ИК ФПУ, не зависящих от времени накопления и приведенных к заряду (в единицах  $e$ ) на накопительной емкости входной ячейки БИС. Данные параметры указаны в табл. 1.

Таблица 1

*Параметры расчета*

$r$ , мкм	$\eta_1$	$I_0$ , фотон/(см <sup>2</sup> с)	$\Phi_{вх}$ , фотон <sup>2</sup> /(см <sup>2</sup> с)	$D_{счит}$ , $e^2$	$v_{ск}$ , мм/с
15	0,5	$5 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{12}$	$70^2$	58,8

Согласованный фильтр, содержащий один ФЧЭ и работающий в течение  $T_{сф} = 255$  мкс, обеспечит значение  $SNR_{сф}$ , равное 84 (см. выражение 5) для указанного МО. Соответствующее значение порогового потока рассчитывается по формуле:  $P_{опт} = W_0/SNR_{опт}$ .

Допустим, требуется разработать матричное ФПУ с режимом ВЗН, которое обеспечит значение  $SNR$  в максимуме двумерной пеленгационной характеристики, превышающее  $SNR_{сф}$  для указанного СФ. При этом максимальный провал двумерной пеленгационной характеристики ( $\tau_{2D}$ ) не должен превышать 20 %. Допустим, необходимо, чтобы относительные значения контраста на выходе ОЭС на частотах  $\xi = 15$  пар линий/мм ( $\omega_x = 2\pi\xi$ ),  $\eta = 0$  пар линий/мм ( $\omega_y = 2\pi\eta$ ) и  $\xi = 0$  пар линий/мм,  $\eta = 15$  пар линий/мм превышали значение 0,4.

Рассмотрим несколько вариантов реализации топологии МФЧЭ. С учетом требований на пространственное разрешение, в рамках текущей задачи будем рассматривать ОЭС без согласованного суммирования сигналов ФПУ. На рис. 16 показаны области значений  $(a,b)$ , соответствующие начальным условиям задачи, при различных  $x_{выб}$  и  $y_{выб}$ . Множества значений  $(a,b)$ , соответствующие  $\tau_{2D1} = 0,2$  показаны красным цветом ( $x_{выб} = y_{выб} = 15$  мкм), а соответствующие  $\tau_{2D2} = 0,2$  – синим цветом ( $x_{выб} = 7,5$  мкм и  $y_{выб} = 15$  мкм). При  $x_{выб} = y_{выб} = 7,5$  мкм все значения  $(a,b)$  в пределах

рассматриваемого диапазона удовлетворяют условию  $\tau_{2D} \leq 0,2$ . Область значений  $(a,b)$ , обеспечивающих требуемые значения  $MTF_1$ , показана светло-зеленым цветом (при  $x_{выб} = y_{выб} = 15$  мкм). Зависимости значений  $SNR$  от размеров ФЧЭ для максимума (синий цвет) и минимума (желтый цвет) двумерной пеленгационной характеристики, полученные по формулам (12) и (14), при различных  $x_{выб}$ ,  $y_{выб}$ , показаны на рис. 17–19. Данные зависимости учтем ниже при получении численного значения  $SNR$  на выходе ОЭС.

Рассмотрим случай  $x_{выб} = y_{выб} = 15$  мкм. Тогда начальным условиям задачи удовлетворяет, к примеру, пара значений  $(a,b)$ , равная  $(2 \times 2, 15R, 2 \times 2, 0R)$  – см. рис. 16. На основе зависимостей, приведенных на рис. 17-19, можно сделать вывод, что требования по  $SNR$  на выходе ИК ФПУ выполняются при  $N_{взн} \geq 8$ .

Данный пример, в частности, демонстрирует, что для того, чтобы обеспечить одинаковое пространственное разрешение как в направлении сканирования, так и в направлении, ортогональном сканированию, необходимо применять ФЧЭ, «вытянутые» в направлении, ортогональном сканированию, ввиду наличия «смаза» изображения вдоль сканирования. Напомним, что максимальное значение  $SNR$  достигается при ФЧЭ, «вытянутом» в направлении сканирования.

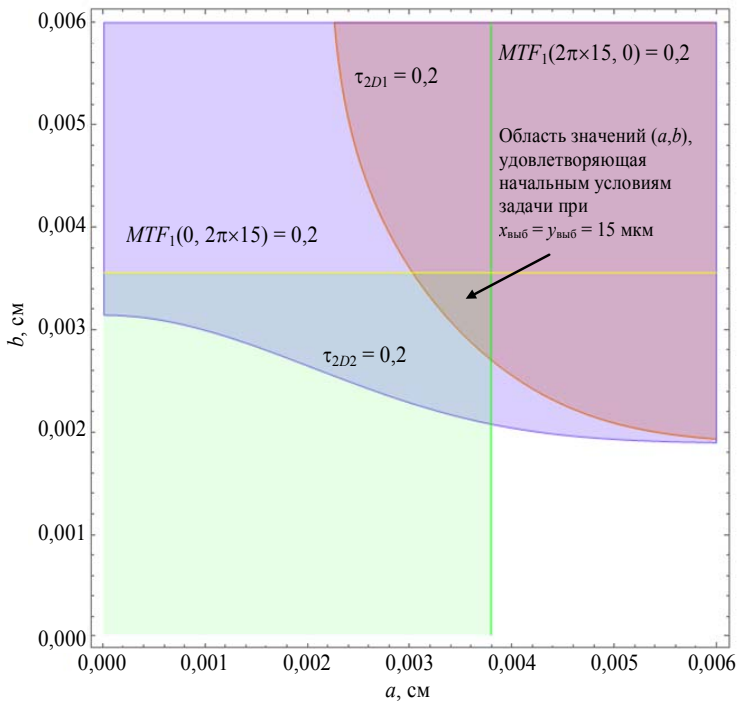


Рис. 16. Области значений  $(a,b)$ , соответствующие начальным условиям задачи при различных  $x_{выб}$  и  $y_{выб}$ .

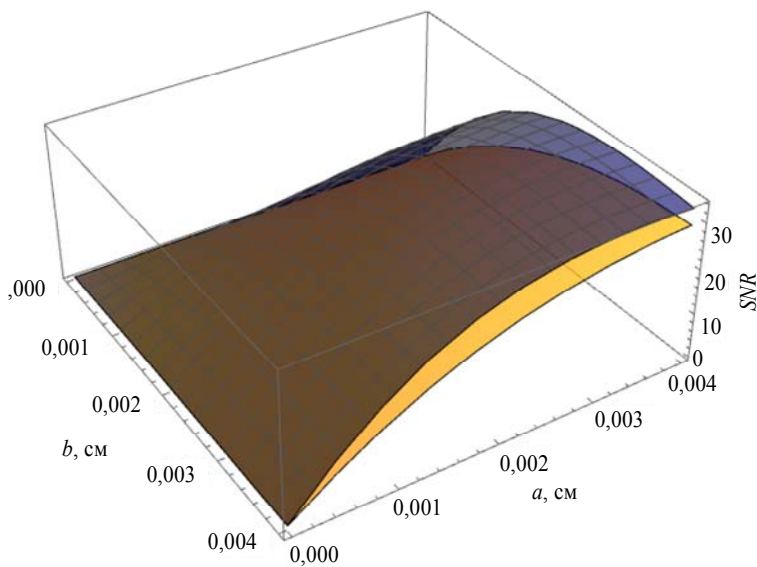


Рис. 17. Зависимости отношения сигнал/шум на выходе ИК ФПУ с  $N_{взн} = 1$  от размеров ФЧЭ при  $x_{выб} = y_{выб} = 15$  мкм.

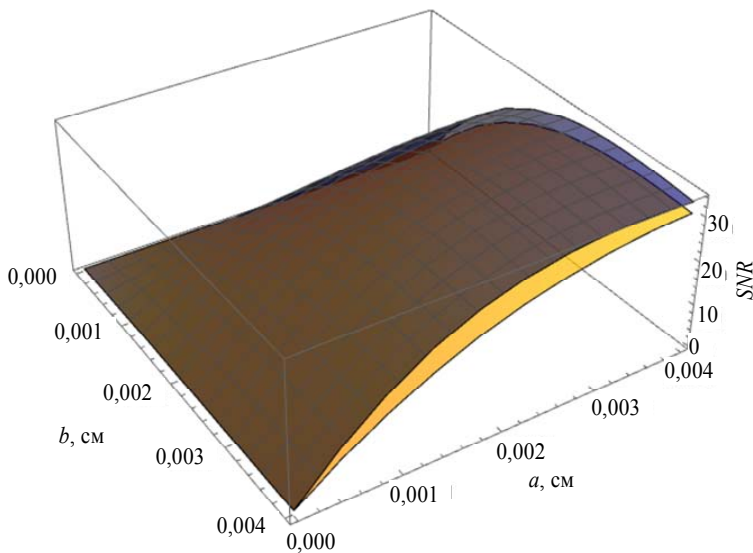


Рис. 18. Зависимости отношения сигнал/шум на выходе ИК ФПУ с  $N_{взн} = 1$  от размеров ФЧЭ при  $x_{выб} = 7,5$  мкм и  $y_{выб} = 15$  мкм.

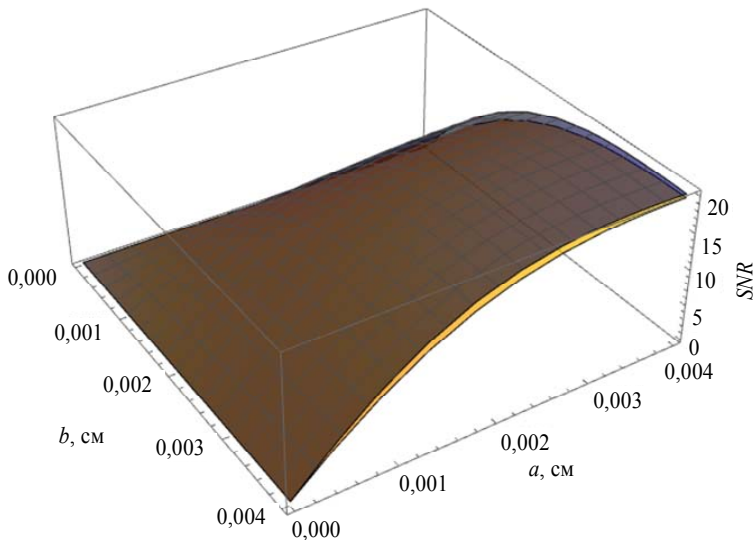


Рис. 19. Зависимости отношения сигнал/шум на выходе ИК ФПУ с  $N_{\text{взн}} = 1$  от размеров ФЧЭ при  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = 7,5$  мкм.

### Заключение

В работе предложен аналитический метод расчета параметров ИК ФПУ с заданной топологией МФЧЭ, осуществляющего регистрацию МО в режиме линейного сканирования. Приведен пример расчета параметров ИК ФПУ при различных параметрах топологии с помощью предложенного метода.

Показано, что максимальные значения отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) на выходе ИК ФПУ (в точках максимума двумерной пеленгационной характеристики, в BLIP-режиме) достигаются при размерах ФЧЭ типа 1 ( $a_{\text{max}}$ ;  $b_{\text{max}}$ ), равных ( $2 \times 1,4R$ ;  $2 \times 1,7 \times R$ ), что согласуется с результатами работы [7], и при размерах ФЧЭ типа 2 ( $A_{\text{max}}$ ;  $B_{\text{max}}$ ), равных ( $R$ ;  $1,14R$ ). Значения периодов пространственной дискретизации  $x_{\text{выб}}$ ,  $y_{\text{выб}}$  равны 15 мкм, если не оговорено иное. В точках минимума двумерной пеленгационной характеристики максимальные значения  $SNR$ , при работе в BLIP-режиме, достигаются при ( $a_{\text{max}}$ ;  $b_{\text{max}}$ ), равных ( $2 \times 2,0R$ ;  $2 \times 2,14R$ ) и ( $A_{\text{max}}$ ;  $B_{\text{max}}$ ), равных ( $1,4R$ ;  $1,56R$ ).

При наличии шума считывания максимальные значения  $SNR$  достигаются при больших размерах ФЧЭ. Например, добавление в систему шумов считывания, численно равных  $D_{\text{счит1}} = A_0^2 \Phi_{\text{вх}} a_1 b_1 T_{\text{нак1}}$  и  $D_{\text{счит2}} = A_0^2 \Phi_{\text{вх}} A_2 B_2 T_{\text{нак1}} / (16\pi^3)$ , где  $a_1 = b_1 = 30$  мкм,  $A_2 = B_2 = R$  (напомним, что  $R = 8,36$  мкм соответствует 80 % энергии в пятне излучения диаметром 30 мкм),  $T_{\text{нак1}} = 255$  мкс, приводит к смещению максимумов зависимостей  $SNR(a)$  и  $SNR(A)$  до точек  $a_{\text{max}} = 2 \times 1,9R$  и  $A_{\text{max}} = 1,4 \times R$  соответственно.

Показано, что при наличии согласованного пространственного фильтра на выходе ФПУ, учи-

тывающего все значимые отсчеты сигналов от МО,  $SNR$  на выходе ОЭС возрастает при увеличении размеров ФЧЭ вплоть до значений  $a \approx b \approx 6R \approx 50$  мкм и  $2A \approx 2B \approx 4,8R \approx 40$  мкм (при  $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = 15$  мкм) в BLIP-режиме. Показано, что при уменьшении периодов пространственной дискретизации, значение  $SNR$  на выходе ОЭС с оптимальным пространственным фильтром возрастает, в том числе при наличии шума считывания, если процедура фильтрации учитывает все значимые отсчеты сигналов от МО. Показано также, что существуют значения  $x_{\text{выб}}^*$  и  $y_{\text{выб}}^*$ , такие что при  $x_{\text{выб}} < x_{\text{выб}}^*$  и  $y_{\text{выб}} < y_{\text{выб}}^*$  отношение сигнал шум на выходе оптимального пространственного фильтра практически не зависит от положения изображения МО относительно сетки выборки.

В следующей работе будет проведен сравнительный анализ конкретных реализаций топологий МФЧЭ ИК ФПУ с режимом ВЗН.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
2. Чижко В. Ф., Касаткин И. Л., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 64.
3. Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Бычковский Я. С., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 63.
4. Громилин Г. И., Иванов В. А., Косых В. П., Попов С. А. // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 60.
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.
6. Grycewicz Thomas J., Cota Stephen A., Lomheim Terrence S., Kalman Linda S. // Remote Sensing System Engineering. 2008. Vol. 7087.
7. Соляков В. Н. Оптимизация топологии многорядных матричных фотоприемных устройств при использовании их в тепловизионных системах с режимом ВЗН / XVI Междуна-

родная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, Россия, 2000.

8. Лазарев П. С., Кондюшин И. С., Коцавцев Н. Ф., Соляков В. Н., Таубкин И. И., Хамидуллин К. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 21.

9. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.

10. Дразников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 566.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

## Analytical method for evaluation of the IR multirow photodetector parameters

K. V. Kozlov<sup>1,2</sup>, V. A. Streltsov<sup>1,2</sup>, A. I. Patrashin<sup>1</sup>, V. P. Kosykh<sup>3,4</sup>, and G. I. Gromilin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>3</sup> Institute of Automation and Electrometry, SB RAS  
1 Koptug av., Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>4</sup> Novosibirsk State University  
2 Pirogova str., Novosibirsk, 630090, Russia

Received October 2, 2017

**Consideration is given to an analytical method for calculation of parameters of the IR photodetector with the defined topology of the photoelement matrix at registration of low-sized objects in the linear scan mode. With regard to the numerous requirements, the method enables to estimate a signal-to-noise ratio and spatial resolution of the IR multirow photodetector using the regime of a temporal delay and accumulation.**

**Keywords:** regime of a temporal delay and accumulation, topology, photodetector, LSI reading, low-sized objects, matched filter.

### REFERENCES

1. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (5), 606 (2013).
2. V. F. Chishko, I. L. Kasatkin, I. D. Burlakov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 2. 64 (2007).
3. K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, Ya. S. Bychkovskii, B. N. Drazhnikov, and P. A. Kuznetsov, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (1), 63 (2017).
4. G. I. Gromilin, V. A. Ivanov, V. P. Kosykh, and S. A. Popov, *Vychislit. Tekhnol.* **21**, 60 (2016).
5. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
6. Thomas J. Grycewicz, Stephen A. Cota, Terrence S. Lomheim, and Linda S. Kalman, *Remote Sensing System Engineering* **7087**, (2008).
7. V. N. Solyakov, in *Proc. XVI Intern. Conf. Photoelectronics* (Moscow, NPO Orion, 2000).
8. P. S. Lazarev, I. S. Kondyushin, N. F. Koshavtsev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 21 (2013).
9. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Foundations*. (Fizmatkniiga, Moscow, 2005) [in Russian].
10. B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kuznetsov, and V. N. Solyakov, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (6), 566 (2015).