

УДК 004.942+519.876.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.031](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.031)

Компьютерная модель матричного фотоприёмного устройства

В.С. Фешенко¹, В.Г. Суринов², В.И. Чукита², В.А. Шепелев¹

¹ООО Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест»,
Москва, Российская Федерация

²Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко,
Тирасполь, Приднестровская Молдавская Республика

Резюме: Разнообразие областей применения, разнородность физических процессов имеющих место при прохождении информации через современные фотоприёмные устройства (ФПУ), создают существенные трудности в проведении над ними натуральных экспериментов во время их разработки и исследования. Особенно это проявляется на этапе разработки аванпроекта, когда отсутствует не только сам ФПУ, но и сама концепция построения прибора. В этом случае особенно актуально провести процесс математического моделирования и построить компьютерную модель предполагаемого ФПУ с целью выбора его компоновки, оптимальных параметров и режимов работы. В данной работе описана разработка компьютерной модели матричного фотоприёмного устройства (МФПУ) начиная с первого этапа, этапа создания первичного образа объекта или системы. На данном этапе определены основные составные части МФПУ и, взаимосвязи между ними, а также управляющие, входные и выходные сигналы. При этом была построена концептуальная модель, которая в идеализированном виде отражает принцип действия и состав МФПУ. Далее была разработана математическая модель МФПУ на основании концептуальной модели, проверена на адекватность и сделан вывод о небольшом предполагаемом отклонении характеристик модели от параметров реального устройства. Далее была осуществлена программная реализация математической модели в среде MATLAB и получена компьютерная модель МФПУ. Компьютерная модель учитывает все основные физические процессы, проходящие в МФПУ. Затем, с целью проверки работоспособности компьютерной модели, были исследованы зависимости качества изображения МФПУ от различных физических и конструктивных параметров и сделан вывод о том, что данную модель можно применить на начальном этапе разработки МФПУ для выработки технических требований к нему и сравнению различных вариантов компоновки.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, математическое моделирование, многоэлементный фотоприёмник, преобразование изображения, фотоприёмное устройство.

Для цитирования: Фешенко В.С., Суринов В.Г., Чукита В.И., Шепелев В.А. Компьютерная модель матричного фотоприёмного устройства. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/FeshchenkoSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.031

The computer model of the matrix photodetector

V.S. Feshchenko¹, V.G. Surinov², V.I. Chukita², V.A. Shepelev¹

¹ООО Ltd "Industrial-Technological Center "UralAlmazInvest", Moscow,
Russian Federation

²T.G. Shevchenko Dniester State University, Tiraspol,
Pridnestrovian Moldavian Republic

Abstract: The variety of applications, heterogeneity of physical processes taking place during the passage of information through modern photodetector devices, create significant difficulties in conducting field experiments on them during their development and research. This is especially evident at the stage of development of the advance project, when there is absent only the photodetector itself, but also the very concept of building the device. In this case, it is especially important to carry out the process of mathematical modeling and build a computer model of the proposed photodetector in order to select its layout, optimal parameters and operating modes. This paper describes the development of a computer model of a matrix photodetector or FPA starting from the first stage, the stage of creating a primary vision of an object or system. At this stage, the main components of the FPA, the relationship between them, input, output and control signals were determined. Thus, a conceptual model was built, which reflects in an idealized form the composition and principle of operation of the FPA. At the next stage, on the basis of the conceptual model, a mathematical model of the FPA was developed, checked for adequacy and concluded that the expected deviation of the characteristics of the model from the parameters of the real device was small. Finally, at the last stage, a software implementation of the mathematical model in MATLAB was carried out and a computer model was obtained. Further, in order to check the performance of this computer model, the dependences of the image quality of the FPA on various physical and structural parameters were investigated and it was concluded that this model can be used at the initial stage of the development of the FPA to develop technical requirements for it and compare different layout options.

Keywords: computer modeling, FPA, image conversion, mathematical modeling, photodetector.

For citation: Feshchenko V.S., Surinov V.G., Chukita V.I., Shepelev V.A. The computer model of the matrix photodetector. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/FeshchenkoSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.031 (In Russ).

Введение

Разнообразие областей применения [1,2], разнородность физических процессов [3-6] имеющих место при прохождении информации через современные фотоприёмные устройства (ФПУ), создают существенные трудности в проведении над ними натуральных экспериментов во время их разработки и исследования. Особенно это проявляется на этапе разработки аванпроекта, когда отсутствует не только сам ФПУ, но и сама концепция построения прибора. В этом случае особенно актуально провести процесс математического моделирования и построить компьютерную модель предполагаемого ФПУ с целью выбора его компоновки, оптимальных параметров и режимов работы.

Компьютерная модель сложного объекта позволяет проявить все основные причинно-следственные связи, которые характеризуют реальные состояния, условия и ограничения. Основные преимущества программной реализации математической модели на компьютере заключаются в том, что отпадает необходимость в длительном и трудоемком этапе макетирования прототипа изделия и нет необходимости нести затраты на изготовление экспериментального образца. Из-за существенного сокращения времени измерения характеристик объекта и времени его исследования, появляется возможность исследовать их большее количество. Да и вообще, становятся не нужны измерительные приборы и дорогостоящее оборудование для испытаний объекта.

Первый этап разработки компьютерной модели обычно является процессом создания первичного образа объекта или системы [7-9]. На данном этапе определяются основные составные части системы и взаимосвязи между ними, а также управляющие, входные и выходные сигналы. Иными словами можно сказать, что процесс математического моделирования начинается с построения концептуальной модели, отражающей принцип действия и состав системы в её идеализированном виде.

Методы

Построение математической модели ФПУ

Возьмём в качестве моделируемого устройства КМОП ФПУ матричного типа [1,2] с квадратным расположением пикселей размерностью $n \times n$, размером пиксела $x \times x$ у.

В общем случае такой ФПУ обладает следующими характеристиками:

- спектральная характеристика;
- формат ФПУ;
- размеры и форма пикселей фоточувствительного слоя;
- обнаружительная способность;
- шумы ФПУ;
- ёмкость ячеек считывания и накопления зарядов;
- пространственно-частотная характеристика;
- параметры усилителей сигналов, АЦП, мультиплексоров и т.д.

На Рисунке 1 представлена физическую модель ФПУ с указанием взаимных связей моделируемого устройства.

Пиксел (2) преобразует оптический сигнал (1) в электрический. Для работающих в УФ диапазоне спектра ФПУ основной характеристикой такого преобразования является спектральная энергетическая чувствительность $S(\lambda)$, измеряемая в А/Вт или В/Вт.

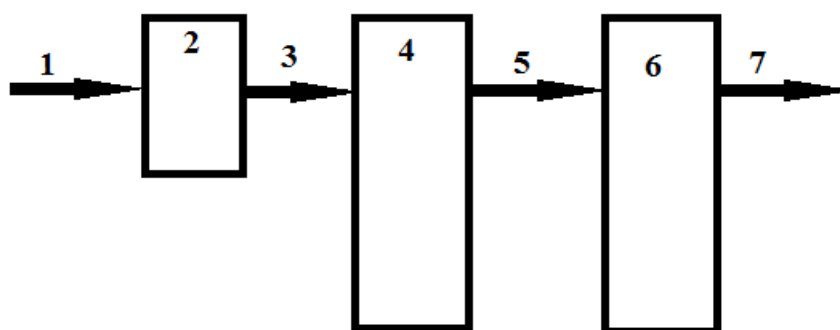


Рисунок 1 – Физическая модель ФПУ

1 – падающее излучение; 2 – пиксел, преобразующий падающее излучение в электрический сигнал; 4 – электронная часть ФПУ, обрабатывающая, коммутирующая и оцифровывающая электрический сигнал; 6 – устройство отображения и визуализации; 7 – выходное изображение.

Figure 1 – Physical model of FPU

1 - incident radiation; 2 - a pixel that converts the incident radiation into an electrical signal; 4 - the electronic part of the FPU, that is processing, switching and digitizing the electrical signal; 6 - display and visualization device; 7 - output image.

Спектральную энергетическую чувствительность можно представлять в следующем виде [1,10] –

$$S(\lambda) = S_{\lambda_M} S_{\text{отн}}(\lambda), \quad (1)$$

где S_{λ_M} – значение спектральной энергетической чувствительности при длине волны,

λ_M , соответствующей максимальной фоточувствительности ФПУ;

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность.

Пороговую чувствительность пиксела определяют величиной, обратной обнаружительной способности $D_{\lambda_M}^*$, которая определяется, как

$$D_{\lambda_M}^* = S_{\lambda_M} \sqrt{\frac{A_{ФПУ} \Delta \nu}{\sigma_u^2}}, \quad (2)$$

где $A_{ФПУ}$ – площадь фоточувствительного элемента ФПУ;

σ_u^2 – дисперсия шума фоточувствительного элемента ФПУ в полосе пропускания $\Delta \nu$ электронного тракта;

Иными словами, уровень минимального обнаруживаемого сигнала можно определить дисперсией аддитивного шума ФПУ. Более полной характеристикой шумов ФПУ является спектр мощности шума.

В КМОП ФПУ считывание изображения осуществляется непосредственно пикселями ФПУ, а электронную часть ФПУ (4) можно рассматривать как пространственный фильтр, который характеризуется передаточной функцией или импульсным откликом. Если формой пикселей (2) является прямоугольник с размерами a и b , то данные характеристики, соответственно, представляются как [2]

$$H_{ФПУ}(x', y') = \frac{1}{ab} \operatorname{rect}\left(\frac{x'}{a}, \frac{y'}{b}\right) \quad (3)$$

$$\tilde{H}(v_x, v_y) = \operatorname{sinc}(\pi v_x a) \cdot \operatorname{sinc}(\pi v_y b) \quad (4)$$

Пространственно-частотная характеристика электронной части ФПУ (4) и ёмкость ячеек накопления и считывания зарядов характеризуются параметром $\tau_{\text{Н}}$ временем интегрирования (накопления) сигнала и периодом считывания T_k этого сигнала. Данные параметры характеризуют период дискретизации и ширину фильтрующего окна по временной координате. Сигнал на выходе ФПУ таким образом подвергается амплитудно-импульсной модуляции и фильтрации.

Кроме пространственной фильтрации оптического сигнала в многоэлементных ФПУ проводится его дискретизация по пространственным координатам. В случае, если ФПУ представляет собой двухмерную матрицу чувствительных элементов, то дискретизация проводится в двух координатах.

При описании модели процесс дискретизации можно рассматривать в качестве амплитудно-импульсной модуляции, которую можно описать математически операцией умножения исходного сигнала на модулирующий. Иными словами, в многоэлементном ФПУ входной сигнал, как по временной, так и по пространственным координатам подвергается модуляции. В случае не сканирующей оптикоэлектронной системы на основе матричного ФПУ, модулирующая функция имеет следующий вид [2]:

$$m(t) = \frac{1}{T_k} \operatorname{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right) \cdot \frac{1}{T_x} \operatorname{comb}\left(\frac{x}{T_x}\right) \cdot \frac{1}{T_y} \operatorname{comb}\left(\frac{y}{T_y}\right), \quad (5)$$

где T_x и T_y – периоды дискретизации сигнала по координатам x и y , соответственно, а T_k – период дискретизации по временной координате (иными словами – период следования кадров).

Уравнениями 1-5 полностью описана математическая модель матричного ФПУ прямоугольного вида, с условием, что устройство отображения и визуализации (6) имеет либо полностью идентичную передаточную функцию, либо если количество пикселей экрана много больше, чем количество пикселей ФПУ, а её время кадра существенно меньше времени кадра ФПУ.

Адекватность полученной таким образом модели целесообразно оценивать критерием адекватности, количественно определяющим различие свойств, которые отображаются в модели, либо рассчитываются в ней [2]. Процедура выбора данного

критерия относится к эвристическим и выполняется с учётом специфики задачи и априорных сведений. Такой критерий должен быть достаточно простым с реализуемым на практике процессом его вычисления.

Критерий адекватности данной модели по совокупности отображаемых свойств представляет собой следующий массив:

$$E = \left\{ \begin{array}{c} x_n \\ y_n \\ X_n \\ Y_n \\ t \\ \lambda \\ D \\ S_i \\ D^* \end{array} \right\}, \quad (6)$$

где свойства x_n, y_n, \dots, D^* описаны далее в Таблице 1.

Таблица 1
 Table 1

| Свойство | Обозначение | Реальное значение | Значение, используемое в модели | Критерий адекватности модели для заданного свойства |
|--------------------------------------|-------------|--------------------|---------------------------------|---|
| Размер пикселей по оси X | x_n | 20±0.5 мкм | 20 мкм | 0.025 |
| Размер пикселей по оси Y | y_n | 20±0.5 мкм | 20 мкм | 0.025 |
| Размер матрицы по оси X | X_n | X_n | X_n | 0 |
| Размер матрицы по оси Y | Y_n | Y_n | Y_n | 0 |
| Время кадра | t | t | t | 0 |
| Длина волны падающего излучения | λ | λ | λ | 0 |
| Динамический диапазон | D | $1.5 \cdot 10^4$ | 65536 | 0.23 |
| Токовая чувствительность | S_i | $S_i \pm 20\% S_i$ | S_i | 0.2 |
| Удельная обнаружительная способность | D^* | $D^* \pm 20\% D^*$ | D^* | 0.21 |

Критерий адекватности модели по j-му свойству может быть выражен следующим образом в относительных единицах [2]:

$$\Delta_j^{omu} = \frac{c_{jm}(a_1, a_2, \dots, a_n) - c_{jt}(a_1, a_2, \dots, a_n)}{c_{jt}(a_1, a_2, \dots, a_n)}, \quad (7)$$

где $c_{jm}(a_1, a_2, \dots, a_n), c_{jt}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ – выходные параметры, характеризующие отображаемое в модели j-е свойство объекта в области функционирования её при

определённых значениях параметров a_1, a_2, \dots, a_n , определяемое для испытуемой модели $c_{jm}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ и сравниваемое с эталонным или заданным значением $c_{ji}(a_1, a_2, \dots, a_n)$. Чем меньше критерий адекватности модели по отдельному свойству, тем оно лучше в ней отображается.

В таблице 1 приведены значения критерия адекватности. По всем свойствам критерий адекватности модели равен:

$$E = \left\{ \begin{array}{l} x_n \\ y_n \\ X_n \\ Y_n \\ t \\ \lambda \\ D \\ S_i \\ D^* \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0.025 \\ 0.025 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.23 \\ 0.2 \\ 0.21 \end{array} \right\} \quad (8)$$

Таким образом следует, что рассматриваемая модель достаточно адекватна, а отклонение от реальности в ней не более 7.6%. После изготовления и исследования экспериментального образца ФПУ возможно дальнейшее совершенствование данной модели.

Программная реализация математической модели ФПУ

В данном разделе представлена компьютерная модель матричного фотоприёмного устройства (ФПУ) изготовленного по КОМОП технологии.

Данная компьютерная модель имеет следующие входные данные (см. Рисунок 2):

- Файл изображения;
- Размерность матрицы ФПУ по двум осям – X и Y;
- Размер пикселей по обеим осям;
- Максимальная яркость изображения в мкВт/пиксел;
- Максимальная емкость накопления ячейки в мультиплексоре;
- Длина волны падающего излучения;
- Время кадра;
- Удельная обнаружительная способность пиксела;
- Токовая чувствительность пиксела;

На выходе программы имеем изображение, которое обработано и преобразовано в ФПУ, и сохранённый файл с этим изображением.

В качестве среды для программной реализации данной модели выбран пакет для вычислений MatLab [10]. Программа реализована в виде М-файла, запускаемого в среде MatLab.

Диалоговое окно программы, реализующей рассматриваемую модель, представлено на Рисунке 2.

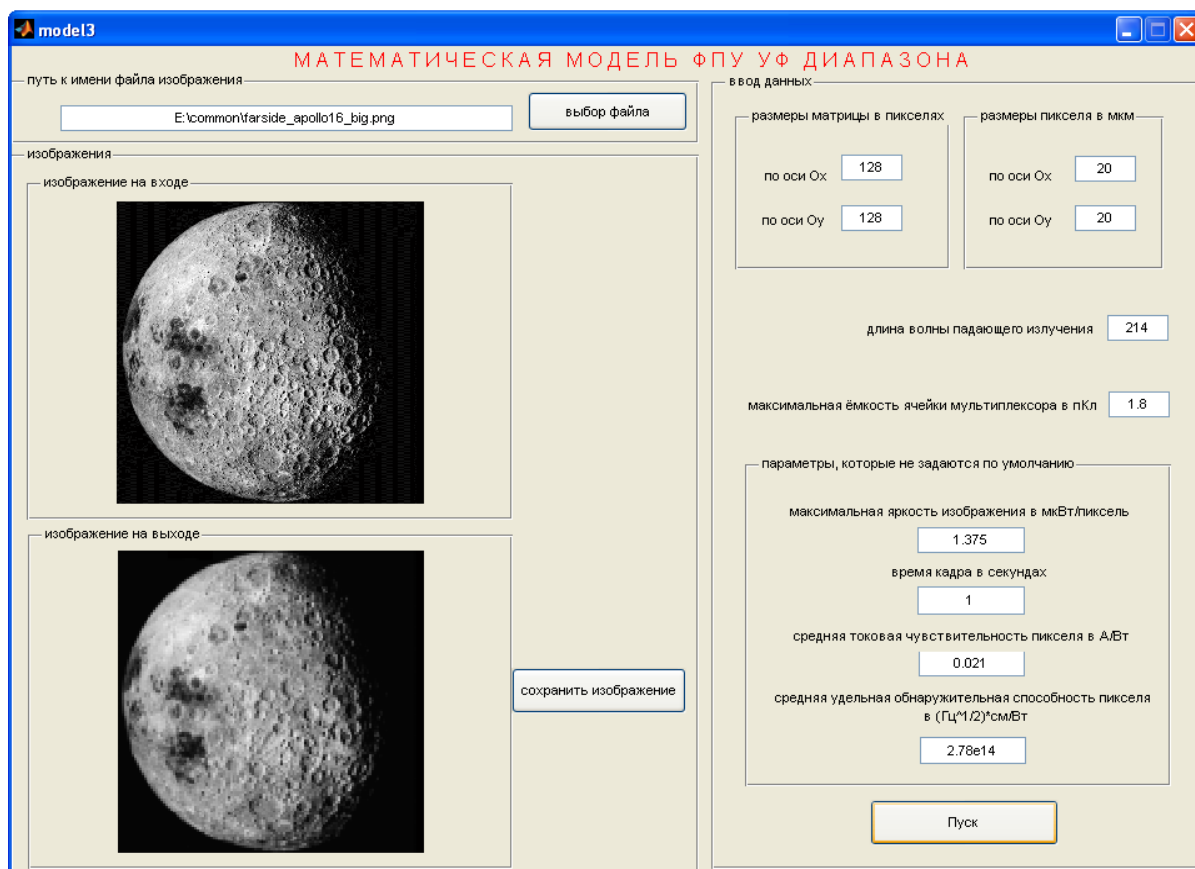


Рисунок 2 – Главное окно программы «Математическая модель ФПУ УФ-диапазона»
Figure 2 – The main window of the program "Mathematical model of FPU of the UV range"

Файл изображения приводится в программе для наглядности процесса преобразования изображения пространства предметов в изображение на устройстве отображения.

Файл изображения должен быть несжатым и может задаваться в различных форматах. Изображение в данном файле должно содержать градации серого цвета. Размер данного изображения, который определяется числом пикселей, должен быть как минимум в десять раз больше размерности матрицы ФПУ.

Размерность матрицы ФПУ задаётся целыми числами. По умолчанию значение этого параметра составляет 128x128 пикселей.

Размер пикселя ФПУ задаётся в мкм, что необходимо для вычисления его площади. При этом, как и в случае реального ФПУ, подразумевается равенство размеров пикселя по обеим осям.

Максимальная емкость накопления ячейки мультиплексора указывается в пКл. Этот параметр необходим для расчёта верхней границы динамического диапазона ФПУ. По умолчанию используется значение реального мультиплексора. Если нужно ввести другое значение данного параметра, то необходимо разделять целую и дробную части числа точкой.

Максимальная яркость изображения указывается в мкВт/пиксел исходя из параметров оптической системы и фоноцелевой обстановки.

Время кадра указывается в секундах и используется для вычисления времени накопления в ячейках мультиплексора.

Длина волны падающего излучения указывается в нм. По умолчанию выставлено значение 214 нм.

Токовая чувствительность пиксела указывается в А/Вт. С помощью данного параметра рассчитывается, как яркость изображения преобразуется в распределение зарядов по ячейкам мультиплексора ФПУ. По умолчанию выставлено значение $S_i = 0.021$ А/Вт.

Удельная обнаружительная способность пиксела указывается в $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2} \cdot \text{см}$ и применяется для расчёта нижней границы динамического диапазона ФПУ.

Алгоритм работы программы, реализующую рассматриваемую модель, представлен на Рисунке 3.

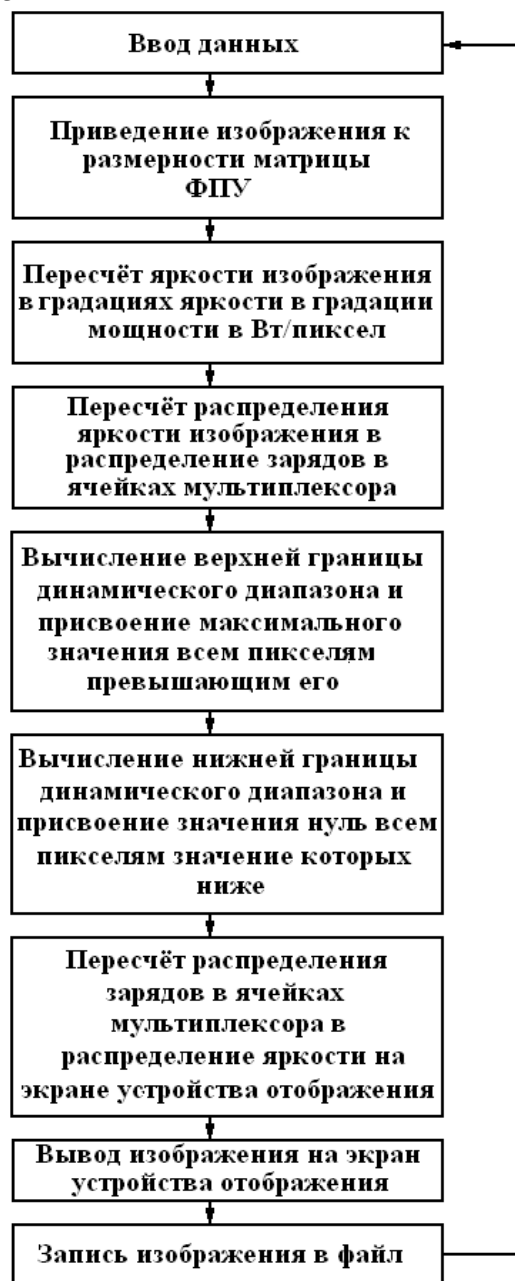


Рисунок 3 – Алгоритм работы программы «Математическая модель ФПУ УФ-диапазона»

Figure 3 – An algorithm of the program "Mathematical model of the UV-range FPU"

Результаты

Описанная выше компьютерная модель была нами опробована при различных параметрах с использованием исходного полутонового изображения, приведённого на Рисунке 4.

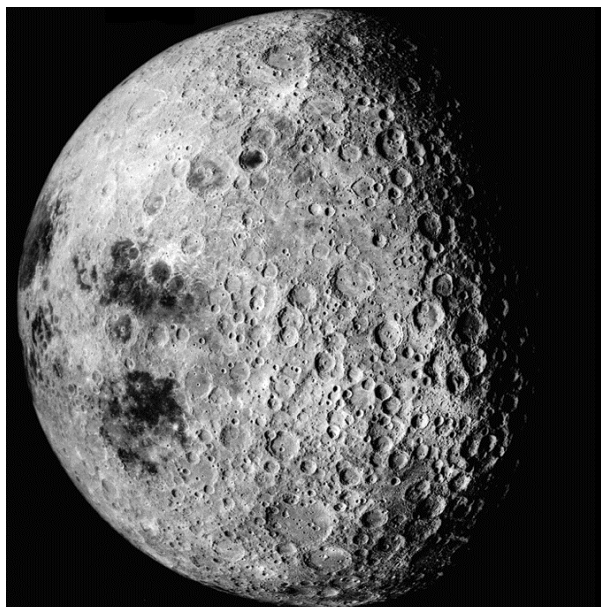


Рисунок 4 – Исходное полутоновое изображение
Figure 4 – An original grayscale image

При работе с данной моделью были получены результаты в виде изображений, которые далее представлены на Рисунках 5-8.

На Рисунке 5 представлено, как зависит качество изображения от времени кадра.

Изображения получены при следующих исходных параметрах:

- Размерность матрицы – 128x128;
- Размеры пиксела – 20x20 мкм;
- Максимальная мощность облучённости – $1.3 \cdot 10^{-5}$ Вт/пиксел;
- Удельная обнаружительная способность – 10^{19} Вт⁻¹Гц^{-1/2}см;

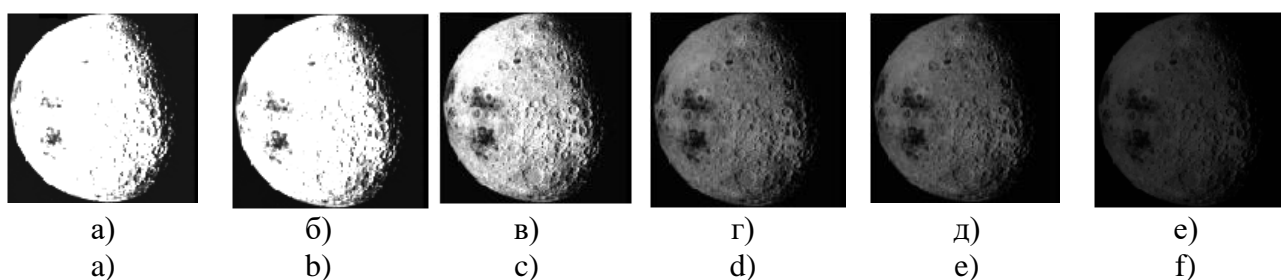


Рисунок 5 – Изображения, полученные при разных значениях времени кадра:
0,6 с (а); 0,4 с (б); 0,2 с (в); 0,1 с (г); 0,08 с (д); 0,04 с (е).

Figure 5 – Images taken at different frame times:

0.6 с (a); 0.4 с (b); 0.2 с (c); 0.1 с (d); 0.08 с (e); 0.04 с (f).

На Рисунке 6 представлено, как зависит качество изображения от удельной обнаружительной способности.

Изображения получены при следующих исходных параметрах:

- Размерность матрицы – 128x128;
- Размеры пиксела – 20x20 мкм;
- Максимальная мощность облучённости – $1.3 \cdot 10^{-5}$ Вт/пиксел;

- Время кадра – 0.18 с.

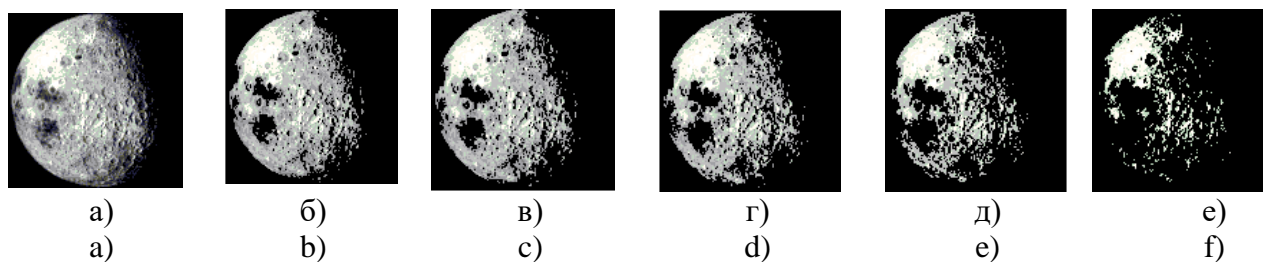


Рисунок 6 – Изображения, полученные при разных значениях удельной обнаружительной способности:

а – $2 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{-1/2} \text{ см}$; б – $1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{-1/2} \text{ см}$;
в – $9 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{-1/2} \text{ см}$; г – $8 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{-1/2} \text{ см}$;
д – $7 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{-1/2} \text{ см}$; е – $6 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{-1/2} \text{ см}$.

Figure 6 – Images obtained at different values of specific detectivity:

а – $2 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ см}$; б – $1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ см}$;
с – $9 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ см}$; д – $8 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ см}$;
е – $7 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ см}$; ф – $6 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ см}$.

На Рисунке 7 представлено, как зависит качество изображения от размерности матрицы.

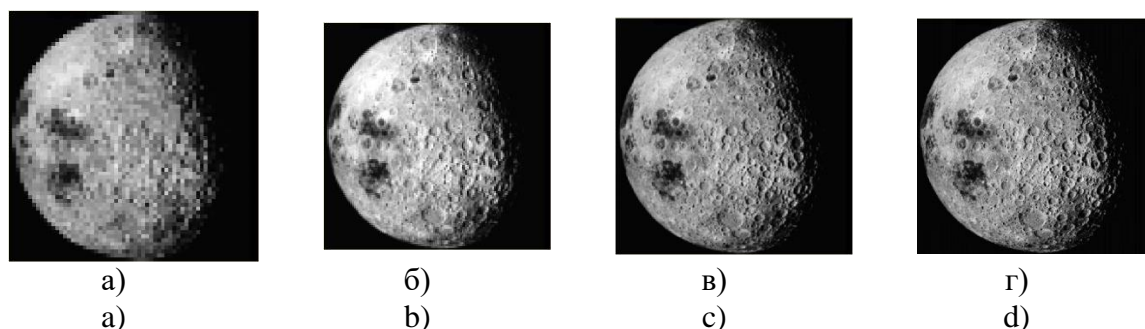


Рисунок 7 – Изображения, полученные при разных значениях размерности матрицы:

а – 64x64; б – 128x128; в – 256x256; г – 512x512.

Figure 5 – Images obtained at different values of the matrix dimension:

а – 64x64; б – 128x128; в – 256x256; д – 512x512.

На Рисунке 8 представлено, как зависит качество изображения от длины волны излучения.

Изображения получены при следующих исходных параметрах:

- Размерность матрицы – 128x128;
- Размеры пиксела – 20x20 мкм;
- Максимальная мощность облучённости – 2,75 мВт/пиксел;
- Время кадра – 0,05 с;

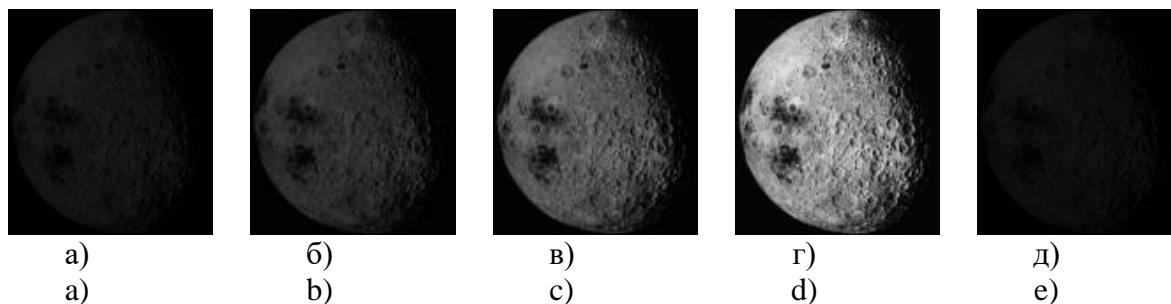


Рисунок 8 – Изображения, полученные при разных значениях длины волны излучения:
а – 190 нм; б – 200 нм; в – 210 нм; г – 220 нм; д – 230 нм.

Figure 5 – Images obtained at different values of the radiation wavelength:
а – 190 nm; б – 200 nm; в – 210 nm; д – 220 nm; е – 230 nm.

Обсуждение

Как видно из представленной серии изображений на Рисунке 5, оптимальное время кадра будет 0.2 с (изображение 5 в), что соответствует частоте телевизионного сигнала 5 Гц. Достижение оптимума при не крайнем значении параметра связано со следующим. С одной стороны, увеличение времени кадра приводит к увеличению накапливаемого сигнала в ячейках и, таким образом, к улучшению качества изображения. Однако с другой стороны – слишком большое накопление сигнала приводит к предельному насыщению ячеек, соответствующих наиболее ярким участкам изображения, что затрудняет их качественную передачу.

Как видно из представленной серии изображений на Рисунке 6, наиболее качественное изображение представлено на Рисунке 6а, где матрица обладает наибольшей чувствительностью, характеризуемой обнаружительной способностью. Этот параметр напрямую влияет на работу ФПУ.

Как нами и предполагалось, качество изображений на Рисунке 7 улучшается слева на право. Изображения на Рисунках 7в и 7 г друг от друга не отличаются. Это произошло потому, что исходный файл был размером 256x256 пикселей и, вследствие этого улучшение разрешения матрицы уже никак не влияет на качество изображения.

Обсуждая результаты, приведённые на Рисунке 8, следует отметить, что рабочим материалом матрицы, в нашем случае был полупроводниковый алмаз. Максимум чувствительности у него приходился на длину волны 222 нм, что и видно на Рисунке. Медленное нарастание яркости изображения, начиная от длины волны 190 нм, до максимума 220 нм и резкий обрыв в районе 230 нм, связанный с краем зоны поглощения полупроводникового алмаза.

Заключение

В работе разработана математическая модель фотоприёмного устройства, которую можно использовать для построения компьютерной модели.

Математическая модель исследована на адекватность и сделан вывод о небольшом предполагаемом отклонении характеристик модели от параметров реального устройства.

Разработана компьютерная модель ФПУ УФ диапазона спектра. Проверена её работоспособность. Данная модель может быть применена на начальном этапе разработки ФПУ для выработки технических требований к нему и сравнению различных вариантов компоновки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушенков Ю.Г. *Проектирование оптико-электронных приборов*. М.: Логос; 2000.
2. Торшина И.П. *Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации*. М.: Университетская книга. Логос. 2009.
3. Hussain M.M. *Advanced Nanoelectronics: Post-Silicon Materials and Devices*. Berlin: Wiley-VCH. 2018.
4. Mohanty P. S., Srivastava A. *Nano-CMOS and Post-CMOS Electronics: Circuits and Design*. London: The Institution of Engineering and Technology Publ.. 2016.
5. Siegmund O.H.W., Vallerga J.V., Darling N., Curtis T., McPhate J., Hull J.S., Cremer T., Ertley C., Foley M., Minot M., Graves G., Paw C.U., Vo C. UV imaging detectors with high performance microchannel plates. *Proc. SPIE 11118, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXI*. 2019; 111180N. Available at <https://doi.org/10.1117/12.2529897>
6. Dao Th.D., Doan A.T., Ishii S., Yokoyama T., Orjan H.S., Ngo D.H., Ohki T., Ohi A., Wada Y., Niikura Ch., Miyajima Sh., Nabatame T. and Nagao T. MEMS-Based Wavelength-Selective Bolometers. *Micromachines*. 2019;10:416-428.
7. Кириллов Н.П. Концептуальные модели технических систем с управляемыми состояниями: обзор и анализ. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2011;4:62-73.
8. Нуждин В.Н. *Концептуальное программирование вычислительных моделей*. Иваново: ИЭИ. 1985.
9. Hubka V., Eder W.E. *Theory of Technical Systems*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1988.
10. Гилат А. MATLAB. *Теория и практика*. М.: ДМК Пресс. 2016.

REFERENCES

1. Yakushenkov Yu.G. *Design of optoelectronic devices*. M.: Logos.2000.
2. Torshina I.P. *Computer modeling of optoelectronic systems for primary information processing*. M.: Universiteckaya kniga. Logos.2009. (In Russ)
3. Hussain M.M. *Advanced Nanoelectronics: Post-Silicon Materials and Devices*. Berlin.Wiley-VCH. 2018.
4. Mohanty P. S., Srivastava A. *Nano-CMOS and Post-CMOS Electronics: Circuits and Design*. London: The Institution of Engineering and Technology Publ.. 2016.
5. Siegmund O.H.W., Vallerga J.V., Darling N., Curtis T., McPhate J., Hull J.S., Cremer T., Ertley C., Foley M., Minot M., Graves G., Paw C.U., Vo C. UV imaging detectors with high performance microchannel plates. *Proc. SPIE 11118, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXI*. 2019;111180N. Available at <https://doi.org/10.1117/12.2529897>
6. Dao Th.D., Doan A.T., Ishii S., Yokoyama T., Orjan H.S., Ngo D.H., Ohki T., Ohi A., Wada Y., Niikura Ch., Miyajima Sh., Nabatame T. and Nagao T. MEMS-Based Wavelength-Selective Bolometers. *Micromachines*. 2019;10:416-428.
7. Kirillov N.P. Conceptual models of technical systems with controlled states: overview and analysis. *Iskusstvenniy intellekt i priniatie resheniy*. 2011;4:62-73. (In Russ)
8. Nuzhdin V.N. *Conceptual programming of computational models*. Ivanovo: IEI; 1985. (In Russ)
9. Hubka V., Eder W.E. *Theory of Technical Systems*. Berlin.Springer-Verlag Berlin Heidelberg.1988.
10. Gilat A. *An Introduction with Applications*. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc..2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Фещенко Валерий Сергеевич, д-р технических наук, доцент, ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», Москва, Российская Федерация, начальник научно-производственной лаборатории №1.

e-mail: feshchenko@mail.ru

ORCID: [0000-0002-9863-1622](https://orcid.org/0000-0002-9863-1622)

Valeriy S. Feshchenko, Dr.Sc. (Engineering), Assistant professor, Industrial-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd., Moscow, Russian Federation, Head of Research and Production Laboratory №1.

Суринов Виктор Георгиевич, к. физ.-мат. наук, доцент, Приднестровский Государственный Университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь, Приднестровская Молдавская республика, заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники.

e-mail: surinov47@mail.ru

Viktor G. Surinov, PhD (Physical and mathematical), Assistant professor, T.G. Shevchenko Dniester State University, Tiraspol, Pridnestrovian Moldavian Republic, Head of the Department of Solid-State Electronics and Microelectronics.

Чукита Виталий Исакович, Приднестровский Государственный Университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь, Приднестровская Молдавская республика, старший преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники.

e-mail: chukita@mail.ru

ORCID: [0000-0002-9332-1561](https://orcid.org/0000-0002-9332-1561)

Vitaliy I. Chukita, T.G. Shevchenko Dniester State University, Tiraspol, Pridnestrovian Moldavian Republic, Senior lecturer at the Department of Solid-State Electronics and Microelectronics.

Шепелев Валерий Андреевич, ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», Москва, Российская Федерация, научный сотрудник научно-производственной лаборатории №1.

e-mail: valq2006@rambler.ru

ORCID: [0000-0003-2595-5527](https://orcid.org/0000-0003-2595-5527)

Valeriy A. Shepelev, Industrial-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd., Moscow, Russian Federation, Researcher of Research and Production Laboratory №1.