

## Оптимизация частотной характеристики многорядных фотоприемных устройств для регистрации малоразмерных объектов

В. А. Стрельцов, К. В. Козлов, О. Д. Смирнова

*В работе предложено решение задачи оптимизации частотной характеристики входных ячеек большой интегральной схемы (БИС) считывания инфракрасных (ИК) многорядных фотоприемных устройств (ФПУ), осуществляющих регистрацию малоразмерных объектов на пространственно-однородном фоне. В качестве критерия выбрано значение отношения сигнал/шум на выходе ячейки. Предложено расположить дополнительные (отключаемые) дискретно-аналоговые фильтры нижних частот (ФНЧ) первого порядка в ячейках БИС после интеграторов. Подключение дополнительных ФНЧ позволит обеспечить высокую чувствительность к излучению малоразмерного объекта, а отключение ФНЧ – высокое пространственное разрешение. В работе определены оптимальные параметры дополнительных ФНЧ, проведено сравнение эффективности работы предложенных ФНЧ с эффективностью согласованного суммирования сигналов от малоразмерного объекта.*

*Ключевые слова:* инфракрасный, ФПУ, частотная характеристика, пеленгационная характеристика, БИС-считывания, малоразмерный объект, согласованный фильтр.

**Ссылка:** Стрельцов В. А., Козлов К. В., Смирнова О. Д. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 526.

**Reference:** V. A. Streltsov, K. V. Kozlov, and O. D. Smirnova, Usp. Prikl. Fiz. 6 (6), 526 (2018).

### Введение

Современные многорядные ФПУ [1–3] широко применяются для регистрации слабых оптических сигналов в ИК-диапазоне спектра. Сканирующие ФПУ позволяют достичь высокой равномерности пеленгационной характеристики при регистрации малоразмерных объектов, за счет применения режима временной задержки и накопления (ВЗН) позволяют снизить требования к дефектности фоточувствительного материала и повысить отношение сигнал/шум на выходе прибора. Режим сканирования позволяет обеспечить расширенные форматы видеоизображения, не достижимые на текущий момент в классических многоэлементных ФПУ «смотрящего» типа. Также при

сканировании существенно упрощается процедура получения многоспектральных изображений, т. к. фоточувствительные элементы (ФЧЭ) различных спектральных диапазонов могут быть пространственно-разнесены, и при этом применение дополнительных оптических элементов (призм, светоделительных пластин и т. д.) для геометрического совмещения составляющих многоспектрального изображения не требуется.

В работе рассматривается класс ФПУ, типовая структурная схема которых приведена на рис. 1. Излучение от объекта наблюдения поступает на вход оптико-механической системы, которая формирует перемещающееся изображение объекта в плоскости матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Сигнал с фоточувствительных элементов (ФЧЭ) поступает во входные ячейки большой интегральной схемы (БИС) считывания, где осуществляется интегрирование, усиление, предварительная фильтрация фотосигналов. С входных ячеек сигналы поступают на схему ВЗН, осуществляющую их суммирование, синхронное с процессом сканирования. На выход БИС фотосигналы поступают после процедур коммутации на один или несколько выходов и предусиления. Дальнейший тракт ФПУ осуществляет аналого-цифровое преобразование и цифровую обработку сигналов, нацеленную на выделение и визуализацию полезной информации.

Стрельцов Вадим Александрович<sup>1,2</sup>, инженер, студент.

Козлов Кирилл Владимирович<sup>1</sup>, гл. специалист, к. ф.-м. н.

Смирнова Ольга Дмитриевна<sup>1,3</sup>, инженер, студент.

<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> МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2018 г.

© Стрельцов В. А., Козлов К. В., Смирнова О. Д., 2018

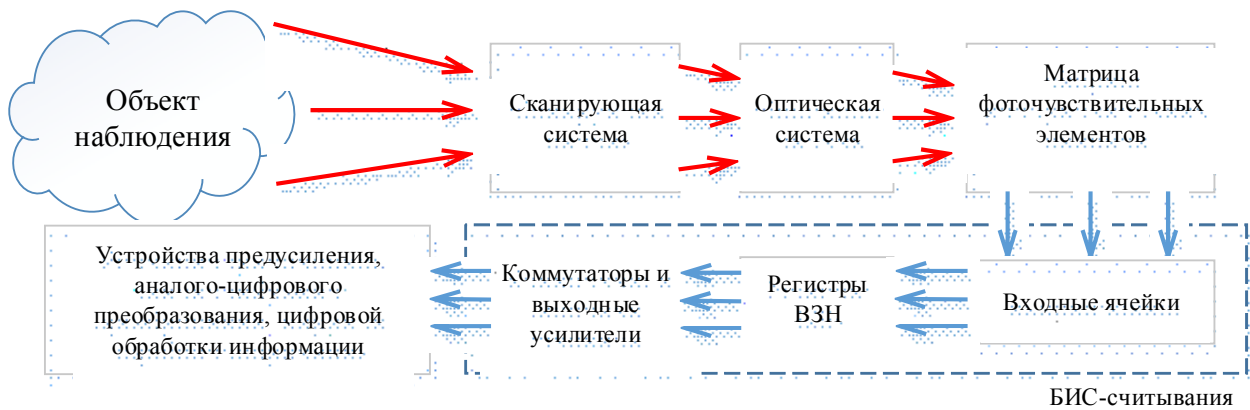


Рис. 1. Типовая структурная схема ФПУ с режимом ВЗН.

В рамках данной работы в роли объекта наблюдения выступает малоразмерный объект, параметры изображения которого полностью определяются характеристиками оптической системы ФПУ. В работе рассматриваются неподвижные малоразмерные объекты (т. е. перемещение изображения малоразмерного объекта в плоскости МФЧЭ задает исключительно сканирующая система) на пространственно-однородном фоне. Для повышения отношения сигнал/шум в режиме регистрации малоразмерного объекта во входных ячейках БИС-считывания предлагается расположить дополнительные фильтры нижних частот (ФНЧ), реализуемые практически. В работе решается задача определения параметров допол-

нительных ФНЧ, при которых достигается максимальное значение отношения сигнал/шум на выходе системы, проводится сравнение эффективности работы предложенных ФНЧ с эффективностью работы согласованного фильтра. Исходными данными для расчетов служат видеоданные, полученные в результате стендовых испытаний ФПУ в режиме регистрации малоразмерного объекта при сканировании.

### Описание входной ячейки с рекурсивным ФНЧ

Структурная схема типовой ячейки БИС-считывания приведена на рис. 2.

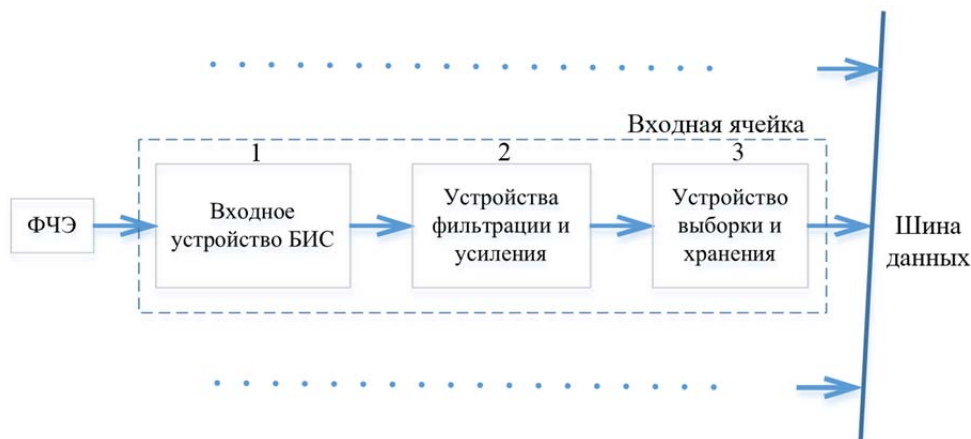


Рис. 2. Структурная схема типовой ячейки БИС-считывания.

Входное устройство БИС, осуществляющее подачу напряжения смещения на ФЧЭ, считывание и интегрирование фотосигналов (блок 1), выполняется, как правило, на базе трансимпедансного усилителя, схем с прямой или буферной прямой инжекцией [4] в зависимости от параметров фоточувствительных структур и рабочего спектрального диапазона.

После устройства интегрирования могут быть расположены устройства ограничения рабочей полосы частот (в составе блока 2) как «снизу» с

помощью фильтров верхних частот, так и «сверху» с помощью фильтров нижних частот с целью устранения неинформативных составляющих входных сигналов и (или) повышения отношения сигнал/шум на выходе ФПУ.

На выходе ячейки располагается устройство выборки и хранения (блок 3), осуществляющее прием сигналов и передачу их на внешние устройства БИС по шине считывания данных при подаче управляющих импульсов.

Эффективная полоса частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$  входной ячейки, как правило, задается интегратором (в составе блока 1) и определяется выражением

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \frac{1}{2T_{\text{нак}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{нак}}$  – время интегрирования фотосигналов.

При теоретическом анализе, проводимом в рамках данной работы, считается, что после интегратора расположен дополнительный дискретно-аналоговый фильтр нижних частот, сужающий эффективную полосу частот входной ячейки. Запишем основные выражения, характеризующие данный фильтр. Согласно [5, С. 363] уравнение рекурсивного фильтра имеет вид

$$y[n] = a_0x[n] + a_1x[n-1] + a_2x[n-2] + a_3x[n-3] + \dots + b_1y[n-1] + b_2y[n-2] + b_3y[n-3] + \dots, \quad (2)$$

где  $x$  – входной сигнал,  $y$  – выходной сигнал,  $a$ ,  $b$  – весовые коэффициенты прямой и обратной связей. Применяя граничные условия  $H[z = e^{-i\omega}]_{\omega=0} = 1$  и  $H[z = e^{-i\omega}]_{\omega=\pi} = 0$  к передаточной функции  $H[z]$  [5, С. 672], получаемой из выражения (2) с помощью Z-преобразования [5, С. 669], перейдем к выражению (3), описывающему рекурсивный фильтр нижних частот первого порядка.

$$y[n] = \frac{1-b_1}{2}(x[n] + x[n-1]) + b_1y[n-1]. \quad (3)$$

Фильтр с данной характеристикой является технически реализуемым [6] во входных ячейках БИС по КМОП-технологии.

Для определения граничной частоты фильтра  $f_{\text{гр}}$  по уровню  $k = 1/\sqrt{2}$  получим выражение, описывающее его амплитудно-частотную характеристику  $A(\omega)$ .

$$A^2(\omega) = \left| H(e^{-i\omega}) \right|^2 = \left| \frac{1-b_1}{2} \frac{1+e^{+i\omega}}{1-b_1e^{+i\omega}} \right|^2 = \frac{(1-b_1)^2}{2} \frac{1+\cos(\omega)}{1+b_1^2-2b_1\cos(\omega)}, \quad (4)$$

тогда

$$A^2(\omega_{\text{гр}}) = k^2 \Rightarrow f_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi T_{\text{выб}}} \arccos \left( \frac{2k^2(1+b_1^2) - (1-b_1)^2}{4k^2b_1 + (1-b_1)^2} \right). \quad (5)$$

## Оптимизация частотной характеристики ячейки с рекурсивным фильтром

Получение исходных данных для теоретического анализа проводилось с использованием образца ФПУ на основе фотодиодов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с режимом ВЗН формата  $1024 \times 10$ , где суммирование осуществляется по 10-ти ФЧЭ каждого из 1024-х каналов ВЗН. Эффективная полоса частот входных ячеек рассматриваемого ФПУ формируется интегратором и определяется выражением (1). Основные параметры ФПУ и малоразмерного объекта приведены ниже:

- периоды пространственной дискретизации изображения сцены вдоль и поперек сканирования: 15 мкм;
- период считывания сигналов из ячейки БИС: 535 мкс;
- время интегрирования сигналов в ячейке БИС: 512 мкс;
- диаметр изображения малоразмерного объекта по уровню 0,67 нормированной функции концентрации энергии: 30 мкм;
- параметры двумерного распределения Гаусса, аппроксимирующего распределение чувствительности ФЧЭ: 17 мкм;
- положение изображения малоразмерного объекта относительно сетки пространственной дискретизации: максимум пеленгационной характеристики.

Примечание: пространственное распределение чувствительности ФЧЭ ( $PSF_{\text{ФЧЭ}}$ ) аппроксимируется распределением Гаусса вида

$$PSF_{\text{ФЧЭ}}(x, y) = e^{-x^2/2R_x^2} e^{-y^2/2R_y^2}, \quad (6)$$

где  $x$ ,  $y$  – координаты Декартовой СК в плоскости МФЧЭ, центрированной относительно ФЧЭ,  $R_x$  и  $R_y$  – параметры распределения Гаусса.

Выходные сигналы ФПУ регистрировались в двух режимах: в «темновом», т. е. при перекрытом заслонкой входном окне ФПУ, а также при засветке МФЧЭ изображением малоразмерного объекта в режиме сканирования.

На рис. 3 (слева) приведен пример видеоизображения с ФПУ в «темновом» режиме. На рис. 3 (справа) приведен график спектральной плотности мощности шума с каналов ФПУ, усредненной по 1024-м каналам для большей информативности. Для анализа использовалась последовательность из 20-ти кадров формата  $1024 \times 2000$ , т. е. для получения спектральной плотности мощности шума с каждого канала использовался массив данных длиной  $2000 \times 20 = 40000$  отсчетов (один отсчет по времени соответствует 535 мкс).

Анализ зависимости, приведенной на рис. 3 (справа), показал, что вклад низкочастотных шумов в интегральное значение шума (СКО) на выходе ФПУ составляет не более 5%. Данное утвержде-

ние справедливо для большей части современных ФПУ что повышает общность результатов данной работы.

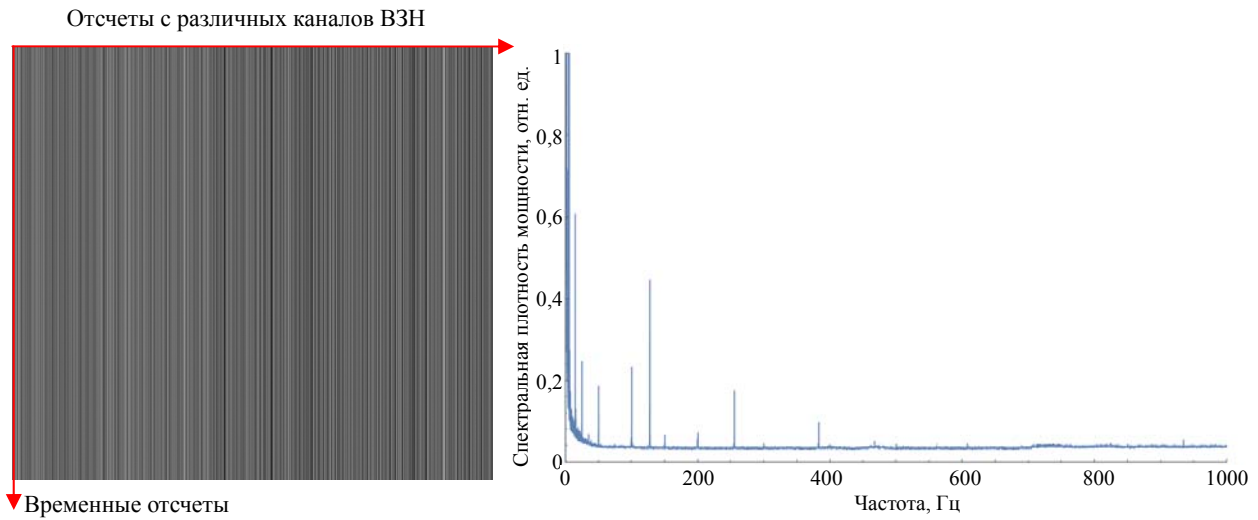


Рис. 3. Экспериментальные данные с ФПУ, полученные в «темновом» режиме.

На рис. 4 (слева) приведен пример видеоизображения с ФПУ в режиме регистрации малоразмерного объекта (после компенсации геометрического шума и вычитания постоянной составляющей). Положение малоразмерного объекта соответствует точке максимума пеленгационной характеристики. Временной срез данных, проходящий через центр изображения малоразмерного

объекта, приведен на рис. 4 (справа). Для получения распределения сигналов от малоразмерного объекта по отсчетам, используемого при теоретическом анализе, была проведена операция усреднения 20-ти кадров с изображением малоразмерного объекта. При оценке отношения сигнал/шум в качестве «сигнала» использовалось значение максимального отсчета.

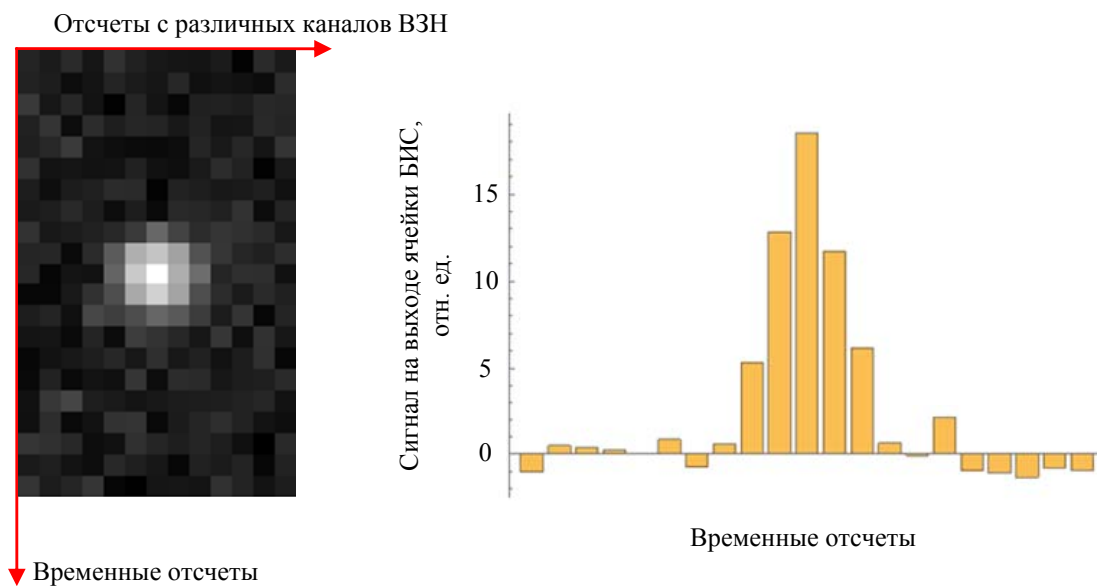


Рис. 4. Экспериментальные данные с ФПУ, полученные в режиме регистрации малоразмерного объекта.

В рамках теоретического анализа в ячейки БИС (после интеграторов) были «виртуально» помещены дополнительные ФНЧ (описываемые выражением 3), реализованные в программном пакете Wolfram Mathematica 11.1. На входы фильтров поступали полученные экспериментально распределения сигнала и шума (см. рис. 3 и 4). СКО шума на выходе интегратора принято равным 1 отн. ед. Тогда отношение сигнал/шум на выходе интегратора равно ориентировочно 18 отн. ед. (см. рис. 4). Зависимость отношения сигнал/шум на выходе ячеек БИС от значения параметра  $b_1$  рекурсивного фильтра приведена на рис. 5. Максимальное значение отношения сигнал/шум достигается при  $b_1 = 0,56$  (соответствует граничной частоте  $f_{гр} = 365$  Гц). Следует отметить, что требования к точности выполнения параметра  $b_1$  при практической реализации ФНЧ низкие: в диапазоне значений  $b_1$  от 0,4 до 0,7 отношение сигнал/шум варьируется не более чем на 5 %.

На рис. 6 приведены: изображение малоразмерного объекта (слева), полученное с учетом дополнительных ФНЧ, и временной срез данных (справа), проходящий через центр изображения малоразмерного объекта. Отметим как существенное возрастание отношения сигнал шум (на 35 %)

за счет дополнительной фильтрации, так и эффект «размазывания» изображения малоразмерного объекта, приводящий к снижению пространственного разрешения. Таким образом, при практической реализации дополнительных ФНЧ внутри БИС рационально предусмотреть возможность их отключения, т. е. реализовать два режима: с высокой чувствительностью при регистрации малоразмерных объектов (включенные ФНЧ) и с высоким пространственным разрешением (отключенные ФНЧ).

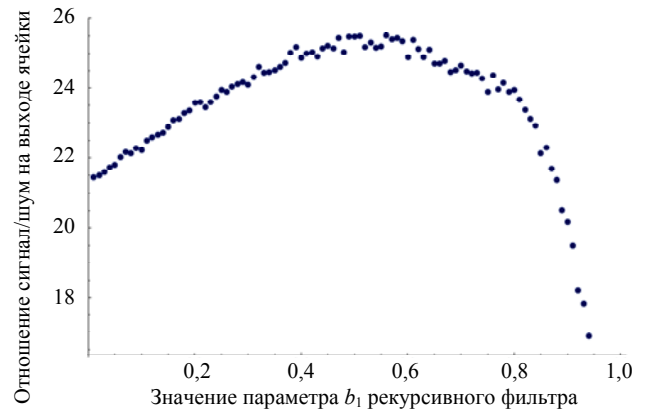


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе ячейки БИС от параметра рекурсивного фильтра.

Отсчеты с различных каналов ВЗН



Временные отсчеты

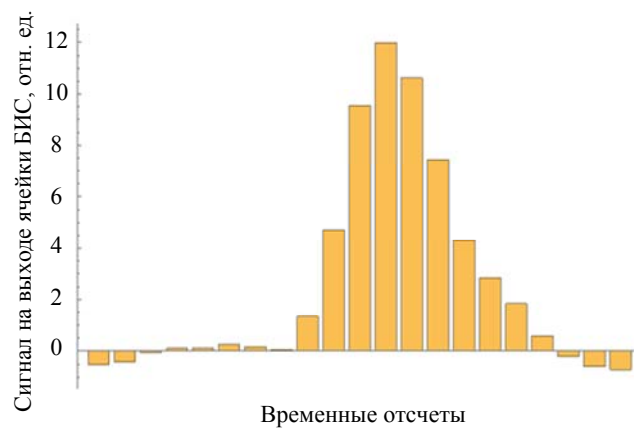


Рис. 6. Экспериментальные сигналы от малоразмерного объекта, прошедшие через дополнительные ФНЧ с  $b_1 = 0,56$ .

На рис. 7 приведены реализации шума с канала ВЗН в «темновом» режиме. Полученная экспериментально реализация показана синим цветом, СКО шума принято равным 1 отн. ед. Реализация, полученная с учетом дополнительных ФНЧ, пока-

зана оранжевым цветом, СКО шума равно 0,54 отн. ед. Таким образом, дополнительные ФНЧ подавляют шум ФПУ ориентировочно в 2 раза, что можно также визуально наблюдать на изображениях (см. рис. 4 и рис. 6).

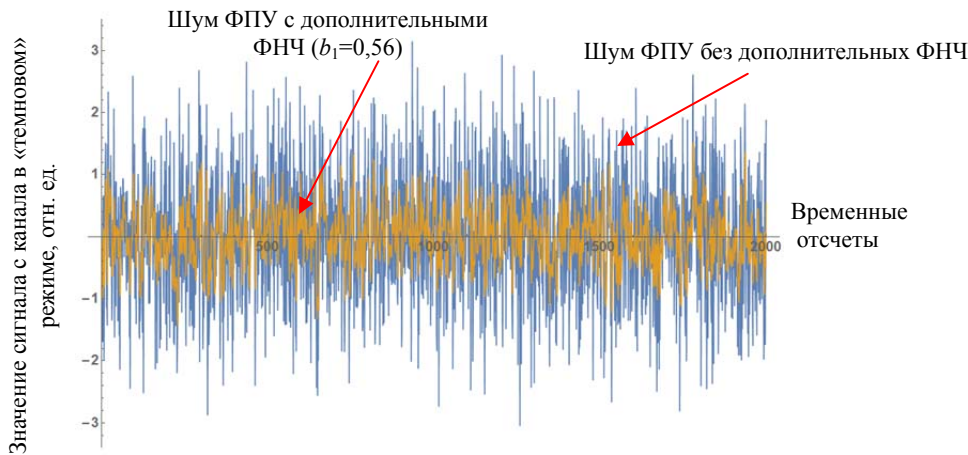


Рис. 7. Реализация шума с учетом и без учета дополнительных ФНЧ.

Был проведен сравнительный анализ эффективности работы дополнительных ФНЧ с  $b_1 = 0,56$  и согласованных фильтров (см. [7]). В ячейки БИС вместо дополнительных ФНЧ были «виртуально» помещены согласованные фильтры, отношение сигнал/шум на выходе которых рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned}
 SNR_{\text{согл}} &= \frac{k_1 U_1 + k_2 U_2 + \dots + k_N U_N}{\sqrt{k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + \dots + k_N^2 \sigma_N^2}} = \\
 &= \frac{k_1^2 + k_2^2 + \dots + k_N^2}{\sqrt{k_1^2 \sigma^2 + k_2^2 \sigma^2 + \dots + k_N^2 \sigma^2}} = \\
 &= \frac{1}{\sigma} \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + \dots + k_N^2},
 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k_1, \dots, k_N$  – коэффициенты согласованного фильтра,  $\sigma$  – СКО шума на выходе интегратора,  $U_1, \dots, U_N$  – значения отсчетов сигнала от малоразмерного объекта на выходе интегратора.

Сравнительный анализ показал, что отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра превышает отношение сигнал/шум на выходе дополнительных ФНЧ с  $b_1 = 0,56$  на 6 %, что означает возможность замены процедуры суммирования сигналов вдоль сканирования в блоке цифровой обработки на дополнительную фильтрацию во входных ячейках БИС.

### Заключение

В работе предложено решение задачи оптимизации частотной характеристики входных ячеек БИС считывания многорядных ИК ФПУ, осуществляющих регистрацию малоразмерных объектов. В качестве критерия выбрано значение

отношения сигнал/шум на выходе ячейки. Предложено расположить дополнительные (отключаемые) дискретно-аналоговые фильтры нижних частот первого порядка в ячейках БИС после интеграторов. Подключение дополнительных ФНЧ позволит обеспечить высокую чувствительность к излучению малоразмерного объекта, а отключение ФНЧ – высокое пространственное разрешение.

Определено значение весового коэффициента обратной связи ФНЧ  $b_1 = 0,56$ , соответствующее максимальному отношению сигнал/шум на выходе дополнительных фильтров (соответствует граничной частоте фильтров  $f_{\text{гп}} = 365$  Гц) при параметрах ФПУ и малоразмерного объекта, указанных в работе. При изменении значения  $b_1$  в диапазоне от 0,4 до 0,7 отношение сигнал/шум на выходе фильтров изменяется не более чем на 5 %. Проведен сравнительный анализ эффективности работы дополнительных ФНЧ с  $b_1 = 0,56$  и согласованных фильтров, который показал, что отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра превышает отношение сигнал/шум на выходе дополнительных ФНЧ всего на 6 %. Таким образом, обоснована возможность замены процедуры согласованного суммирования сигналов от малоразмерного объекта вдоль сканирования в блоке цифровой обработки на дополнительную фильтрацию во входных ячейках БИС.

### 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., Стрельцов В. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 155.

4. Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Бычковский Я. С., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 63.
5. Смит Стивен. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. – М.: Додэка-XXI, 2012.

6. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М.: Радио и связь, 1992.
7. Дражников 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

## Optimization of the frequency response of multi-row photodetector devices for the registration of small-sized objects

V. A. Streltsov<sup>1,2</sup>, K. V. Kozlov<sup>1</sup>, and O. D. Smirnova<sup>1,3</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 Institutskiy al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>3</sup> MIREA – Russian Technology University (RTU MIREA)  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received December 17, 2018

***The paper proposes a solution to the problem of optimizing the frequency response of the input cells of a large integrated circuit (LSI) reading infrared (IR) multi-row photoreceiving devices (FPU) that record small-sized objects on a spatially uniform background. The criterion is the value of the signal-to-noise ratio at the output of the cell. It is proposed to place additional (disconnectable) discrete-analog low-pass filters (low-pass filters) of the first order in LIS cells after integrators. Connecting additional low-pass filters will provide high sensitivity to radiation of a small object, and turning off the low-pass filters will provide high spatial resolution. In the work, the optimal parameters of additional low-pass filters were determined, the performance of the proposed low-pass filters was compared with the efficiency of coordinated summation of signals from a small object.***

***Keywords:*** infrared, FPU, frequency response, direction finding characteristic, BIS readout, small object, matched filter.

### REFERENCES

1. P. A. Kyznetsov, 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, and V. A. Streltsov, Usp. Prikl. Fiz. **5** (2), 155 (2017).
4. K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, et al. Usp. Prikl. Fiz. **5** (1), 63 (2017).
5. S. Smith, *Digital signal processing. A practical guide for engineers and scientists* (Dodeka-XXI, 2012) [in Russian].
6. M. A. Trishenkov, *Photoreceiver Devices and CCD* (Radio Svyaz', 1992) [in Russian].
7. B. N. Drajnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kyznetsov, and V. N. Solyakov, Usp. Prikl. Fiz. **3** (6), 566 (2015).