

УДК 621.383.4/5

Фильтрация методом Савицкого-Голея спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств

А. В. Никонов, Р. В. Давлетшин, Н. И. Яковлева, П. С. Лазарев

При пересчете спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств с низким значением отношения сигнал/шум перед исследователями возникает задача фильтрации шума с сохранением положения границ и максимума чувствительности. В исследовании проведено сравнение методик фильтрации спектральных характеристик чувствительности: метода скользящего среднего и его вариаций, интерполяция сплайнами, методика расчёта по кривым Безье, метод Савицкого-Голея. Установлены критерии выбора неразрушающей расчетной методики, не вносящей погрешность в значения границ диапазона и максимума чувствительности МФПУ. Выбран и обоснован оптимальный метод пересчёта спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

Ключевые слова: матричные фотоприемные устройства, спектральная характеристика, фильтр Савицкого-Голея, метод скользящего среднего, сплайн.

Введение

Одной из ключевых задач в процессе изготовления матричных фотоприемных устройств (МФПУ) является контроль их оптических параметров [1]. Спектральная характеристика чувствительности МФПУ является важным источником

информации: определение границ и максимума чувствительности из спектральной характеристики позволяет рассчитывать такие параметры, как коэффициенты использования при различных температурах абсолютно черного тела и удельную обнаружительную способность [2].

При низких значениях отношения сигнал/шум установить корректные значения границ и максимума чувствительности с высокой точностью является затруднительным, что демонстрирует рис. 1, где приведена спектральная характеристика чувствительности $SX(k)$ фотоприемной линейной матрицы формата 4×576 элементов (отношение сигнал/шум ≈ 20 , $k = 1/\lambda$). В связи с этим при пересчёте спектральной характеристики применяются методики фильтрации шума.

Данная работа посвящена анализу существующих алгоритмов фильтрации статистических данных и выбору оптимальной методики, не вносящей погрешности в диапазон чувствительности фотоприемного устройства.

Никонов Антон Викторович, ведущий инженер НИЦ¹, зам. зав. кафедрой².

Давлетшин Ренат Валиевич, инженер¹, студент².

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

Лазарев Павел Сергеевич, ведущий инженер НТЦ¹, ассистент².

¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(государственный университет).

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

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.

© Никонов А. В., Давлетшин Р. В., Яковлева Н. И., Лазарев П. С., 2016

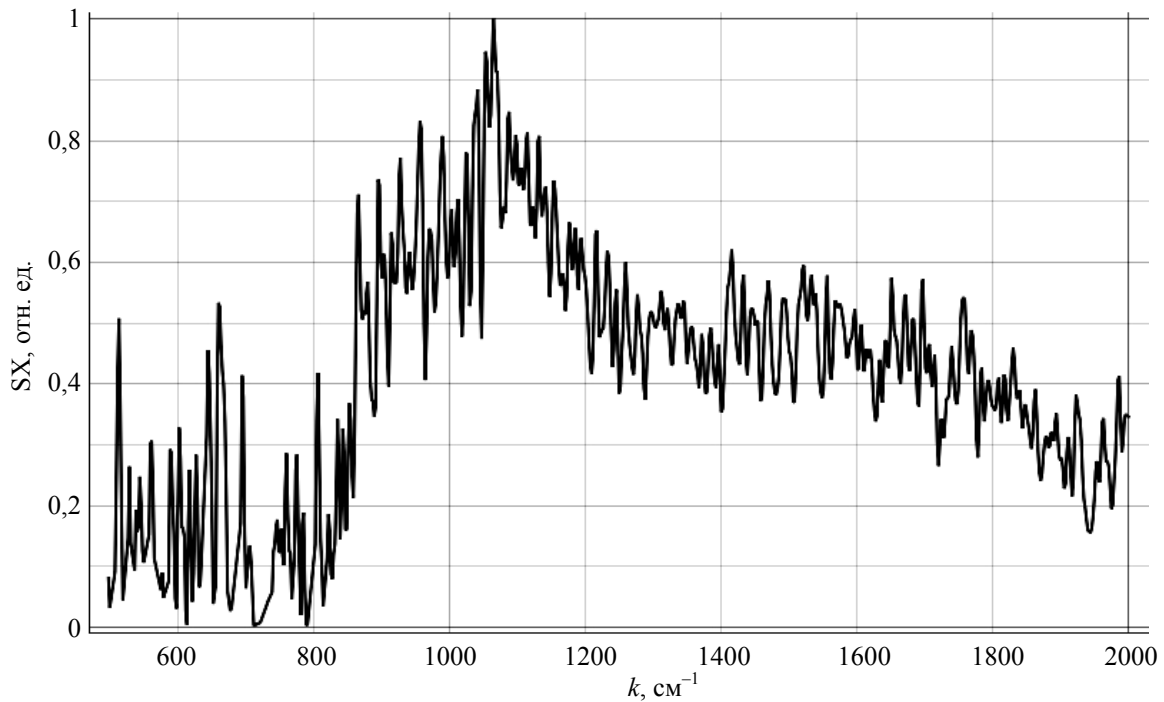


Рис. 1. Спектральная характеристика чувствительности $SX(k)$ фотоприемной линейной матрицы формата 4×576 элементов (отношение сигнал/шум ≈ 20).

Численные методы интерполяции спектральных характеристик чувствительности

Одним из наиболее распространенных фильтров низких частот, используемых в обработке сигналов, является метод скользящего среднего [3]. В общем случае простое скользящее среднее численно равно среднему арифметическому значений исследуемой спектральной характеристики на установленном диапазоне и вычисляется по формуле:

$$f_{sma}(k_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-1} f(k_{i-j}) = \frac{f(k_i) + f(k_{i-1}) + f(k_{i-2}) + \dots + f(k_{i-j+1})}{n},$$

где $f_{sma}(k_i)$ — расчётное значение чувствительности на волновом числе k_i после пересчёта; $f(k_i)$ — измеренное значение чувствительности для данного k_i ; n — количество значений из набора волновых чисел для расчёта скользящего среднего (сглаживающий интервал). Ширина сглаживающего интервала определяет степень плавности спектральной характеристики чувствительности после применения данного типа фильтрации.

Метод модифицированного скользящего среднего является рекуррентным соотношением, для которого значение чувствительности при заданном волновом числе связано с предыдущим значением чувствительности:

$$f_{mma}(k_i) = \frac{f(k_i) + (n-1) \cdot f_{mma}(k_{i-1})}{n}.$$

Здесь $f_{mma}(k_i)$ и $f_{mma}(k_{i-1})$ — рассчитанные значения чувствительности для пары значений волнового числа (k_i, k_{i-1}) .

Расширенной альтернативой методу простого скользящего среднего является метод линейно взвешенного скользящего среднего [4], при применении которого вес каждого значения исходной спектральной зависимости, начиная с меньшего, равен соответствующему члену арифметической прогрессии. При этом функция значимости является линейно убывающей:

$$f_{wma}(k_i) = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) f(k_{i-j}) = \frac{n \cdot f(k_i) + (n-1) \cdot f(k_{i-1}) + \dots + 1 \cdot f(k_{i-j+1})}{n + (n-1) + \dots + 1},$$

где $f_{wma}(k_i)$ — расчётное значение чувствительности на волновом числе k_i после пересчёта методом линейно взвешенного скользящего среднего.

Помимо функций скользящего среднего, в расчётах использовались модели скользящих на основе других усредняющих функций, в частности, модель скользящей медианы.

В системах компьютерного моделирования также используются и другие методы обработки измерений, в частности, интерполяция сплайнами [5]. В рамках данной интерполяции пересчитан-

ный спектр на каждом волновом отрезке $[k_i, k_{i+1}]$ характеризуется полиномом заданной степени $P_i(x)$, коэффициенты которого определяются расчётным путём. Для каждого волнового числа на полном диапазоне измерений значение сплайна соответствует исходному значению характеристики, что характеризует возможность использования интерполяции сплайнами в качестве механизма фильтрации шумов. Наиболее соответствующими поставленной задаче являются сплайны степени 3 и имеющие нулевой дефект:

$$P_i(k_i) = a_i + b_i(k - k_i) + \frac{c_i}{2}(k - k_i)^2 + \frac{d_i}{6}(k - k_i)^3,$$

при этом:

$$P_i(k_i) = a_i, \quad P_i'(k_i) = b_i, \quad P_i''(k_i) = c_i.$$

Условия непрерывности всех производных до второго порядка включительно записываются в виде:

$$P_i(k_{i-1}) = P_{i-1}(k_{i-1})$$

$$P_i'(k_{i-1}) = P_{i-1}'(k_{i-1})$$

$$P_i''(k_{i-1}) = P_{i-1}''(k_{i-1})$$

а условие интерполяции — в виде

$$P_i(k_i) = SX(k_i),$$

где $SX(k_i)$ — значение чувствительности МФПУ на волновом числе k_i .

Из приведенных условий выводятся формулы для вычисления коэффициентов сплайна:

$$a_i = SX(k_i),$$

$$h_i c_{i-1} + 2(h_i + h_{i+1})c_i + h_{i+1}c_{i+1} = 6 \left(\frac{SX_{i+1} - SX_i}{h_{i+1}} - \frac{SX_i - SX_{i-1}}{h_i} \right),$$

$$d_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{h_i},$$

$$b_i = -\frac{1}{3}h_i c_i - \frac{1}{6}h_i d_i + \frac{SX_i - SX_{i-1}}{h_i} = \frac{SX_i - SX_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i(2c_i + c_{i-1})}{6}.$$

Вычисление коэффициентов c_i проводится методом прогонки по трехдиагональной матрице Якоби [6] с учетом граничных условий $c_0 = c_n = 0$.

В системах автоматизированного проектирования и моделирования в качестве ключевого расчётного инструмента сглаживания используются кривые Безье [7]. Наиболее функциональными яв-

ляются кривые Безье, представляющие собой полиномы третьей степени. Но в отличие от интерполяции кубическим сплайном, для которой является обязательным условием совпадение значений начальной и конечной функций по набору волновых чисел, интерполяция кривой Безье не накладывает таких ограничений на результат фильтрации. Данный факт говорит о том, что интерполяция кривой Безье спектральных характеристик чувствительности является разрушающей расчётной методикой, априори вносящей погрешность в значения границ диапазона и максимума чувствительности МФПУ.

В областях обработки экспериментальных данных и фильтрации цифровых сигналов набирает популярность фильтрация методом Савицкого-Голея [8, 9]. В данной фильтрации вместо линейного приближения в окрестности каждой точки измерения строится аппроксимирующий полином n -го порядка по методу наименьших квадратов. Значение чувствительности при заданном волновом числе k заменяется значением полинома в этой точке:

$$sg(k_i) = a_0 + a_1 \cdot SX(k_i) + a_1 \cdot SX(k_{i+1}) + \dots + a_n \cdot SX(k_{i+n-1}).$$

В расчётах используется усредняющий интервал (окно сглаживания), включающий в себя по $m = (n-1)/2$ точек слева и справа от текущего значения волнового числа. Коэффициенты такого полинома не зависят от исходного набора значений чувствительности МФПУ, а определяются только размером окна сглаживания и порядком полинома аппроксимации. Задача фильтрации сводится к расчету вектора коэффициентов $a = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ с использованием критерия минимальной среднеквадратичной оценки по матричному расчёту:

$$(Z^T Z)^{-1} \cdot a = -Z^T \cdot sx,$$

где sx — вектор измерений, а Z — матрица Вандермонда [10], имеющая размерность $(n+1) \cdot (2m+1)$, причем m — ширина окна сглаживания. Из данного матричного уравнения коэффициент a_i ($i = 0 \dots n$) вычисляется как результат умножения i -й строки матрицы $-(A^T A)^{-1} A^T$ на вектор измерений. Сглаженное значение функции спектральной характеристики или её производных t -го порядка определяется в виде свертки:

$$sg^{(t)} = t! \sum_{i=-m}^m a_i SX_i.$$

Для малых значений n коэффициенты можно вычислить аналитически, но в случае $n > 3$ (ап-

проксимирующие полиномы высоких степеней) коэффициенты фильтра определяются матричным расчетом на основе стандартных вычислительных процедур линейной алгебры.

Результаты реализации методик фильтрации шумов для спектральных характеристик чувствительности

В ходе исследования проведена оценка влияния описанных сглаживающих методик для фильтрации шумов в спектральных характеристиках на положение границ и максимума чувствительности матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона. Измерения спектральных характеристик проводились для МФПУ форматов 320×256, 4×288, 10×1024 элементов. Оценочными критериями качества механизма фильтрации являлись значения сдвигов границ чувствительности и среднеквадратичное отклонение (СКО) экспериментальной и расчётной характеристик. На рис. 2 и в табл. 1 приведены результаты фильтрации простым скользящим средним на спектральной характеристике чувствительности пятиэлементного фотоприемного устройства, предназначенного

для бортового ИК Фурье-спектрометра космического аппарата «Метеор-М». Показано, что при увеличении ширины сглаживающего интервала (ШСИ) происходит значительное смещение как максимума, так и границ диапазона чувствительности. В то же время применение фильтрации с аналогичными параметрами позволяет избавиться как от шумов, так и от влияния поглощения излучения в атмосфере. Так, на рис. 3 представлена спектральная характеристика чувствительности МФПУ формата 4×576 элементов спектрального диапазона 3,7—4,1 мкм, которая показывает, что фильтрация ПСС позволяет эффективно избавиться как от шумов, так и от влияния повышенного количества углекислого газа в диапазоне волновых чисел 2300—2400 см⁻¹. Схожим образом ведёт себя фильтрация методом линейно взвешенного скользящего среднего. Применение данной фильтрации для образца ФПУ № 3-01 показало смещение максимума и границ чувствительности в среднем на 0,03 мкм для ШСИ 10 точек (при этом СКО расчётной и экспериментальной характеристик составило 0,88 %) и на 0,05 мкм для ШСИ 20 точек (СКО 1,82 %).

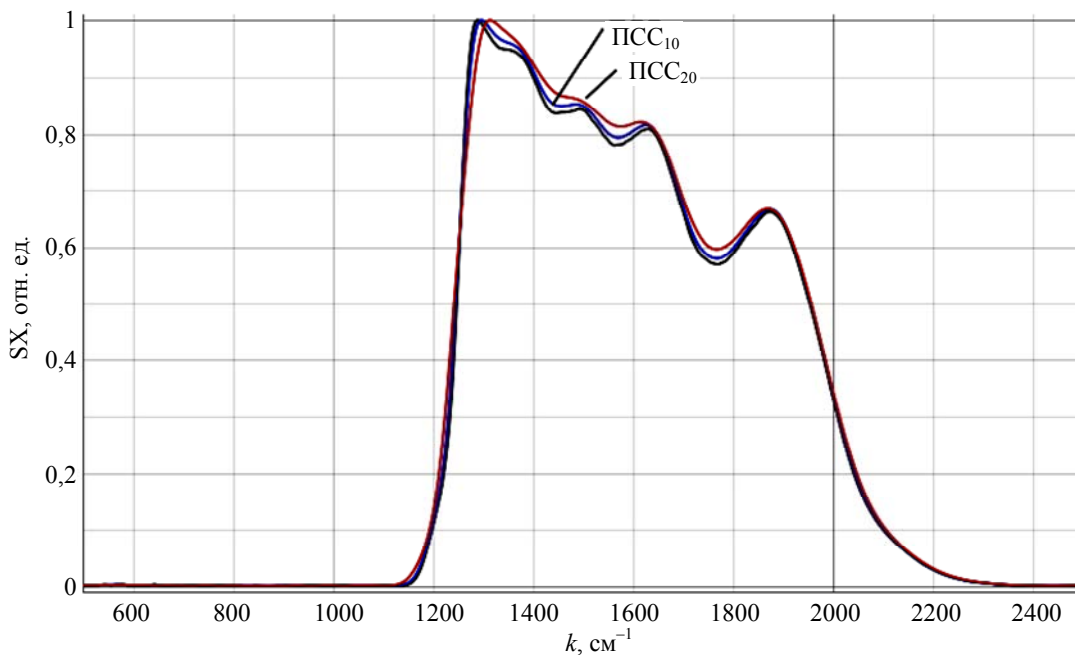


Рис. 2. Сравнение применения фильтрации шума методом простого скользящего среднего (ПСС) с шириной сглаживающего интервала (ШСИ) 10 и 20 точек измерения (образец № 3-01).

Таблица 1

Параметр	Экспериментальная характеристика	Фильтрация ПСС	
		ШСИ 10 точек	ШСИ 20 точек
Максимум чувствительности	1290,2 см ⁻¹ (7,75 мкм)	1297,9 см ⁻¹ (7,70 мкм)	1315,3 см ⁻¹ (7,60 мкм)
Коротковолновая граница чувствительности	1954,8 см ⁻¹ (5,12 мкм)	1956,6 см ⁻¹ (5,11 мкм)	1958,1 см ⁻¹ (5,11 мкм)
Длинноволновая граница чувствительности	1248,9 см ⁻¹ (8,01 мкм)	1247,1 см ⁻¹ (8,02 мкм)	1243,5 см ⁻¹ (8,04 мкм)
СКО, %	—	0,47 %	1,23 %

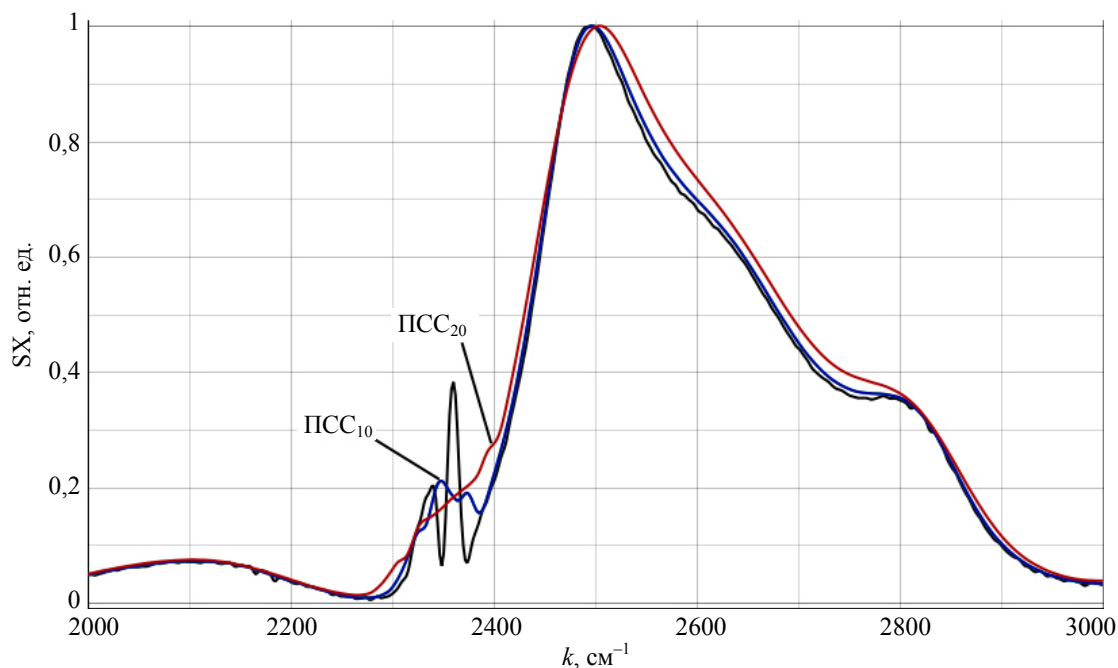


Рис. 3. Сравнение фильтрации шума методом ПСС для образца № 9-14 при повышенном содержании CO_2 в атмосфере.

Применение интерполяции спектральной характеристики сплайном позволило получить более гладкие спектральные характеристики, но данный метод показал свои недостатки в виде некорректных значений чувствительности на границах диа-

пазона (см. рис. 4). При использовании данного метода удаётся избавиться от малых значений шумов, но при дальнейшем повышении амплитуды шумов данная методика показывает свою неэффективность (см. рис. 5).

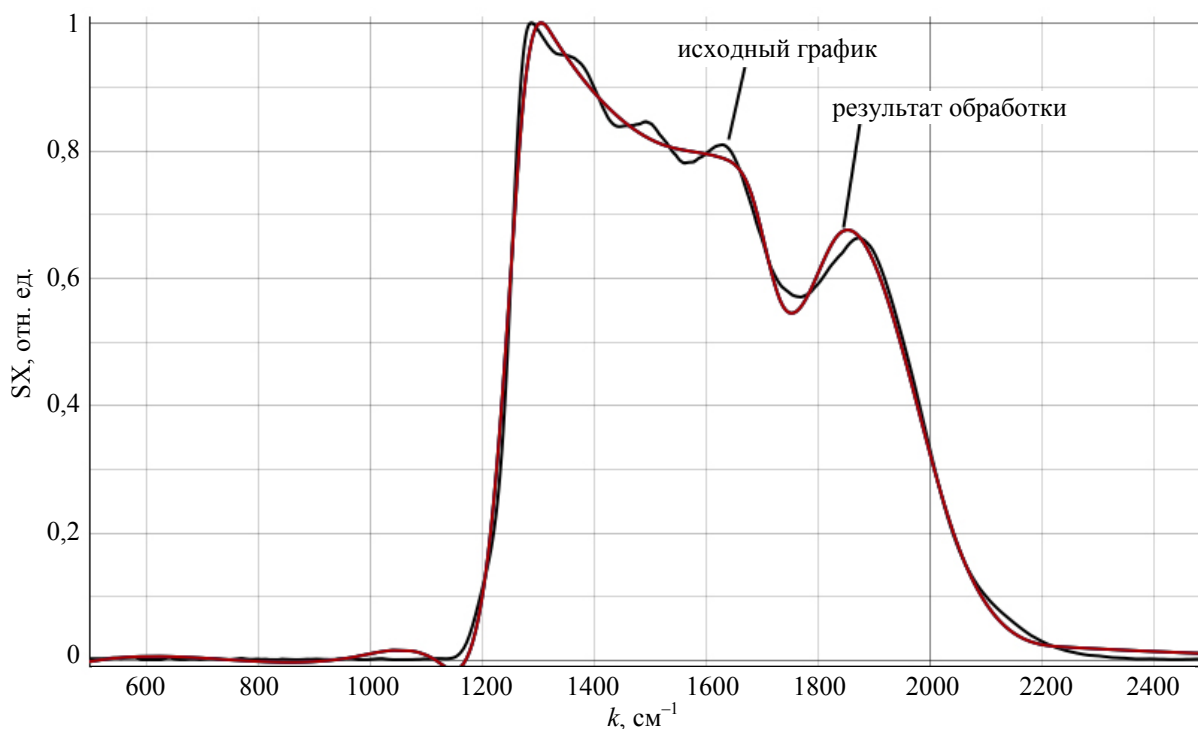


Рис. 4. Применение интерполяции сплайном для спектральной характеристики образца № 3-01.

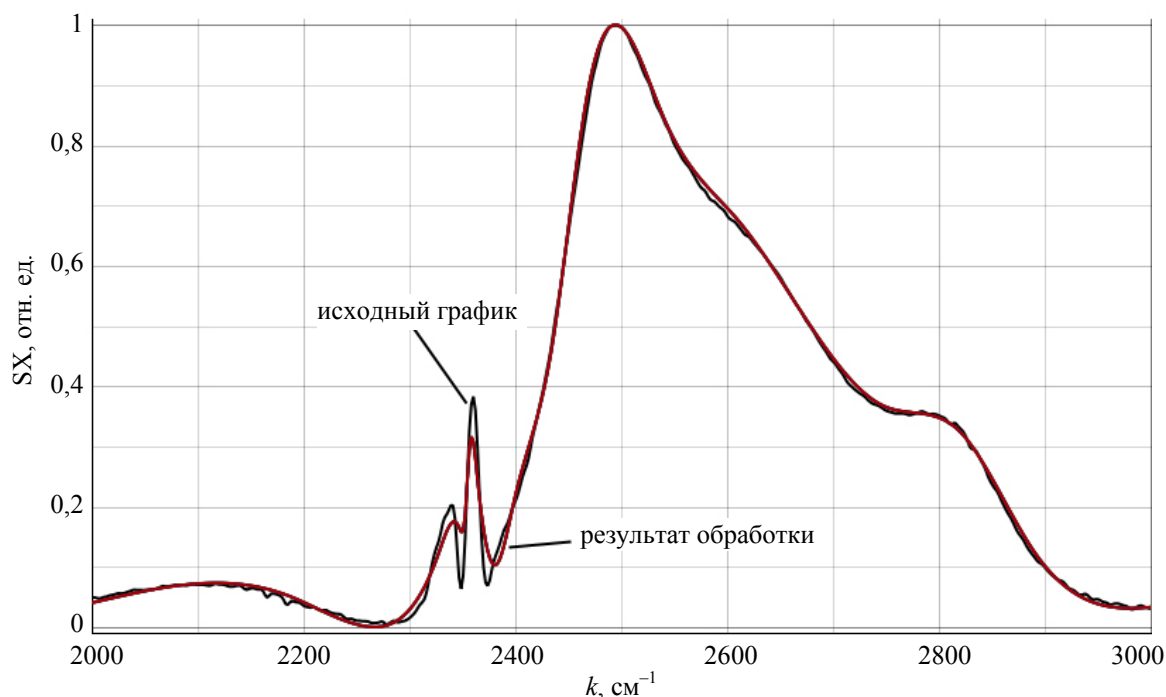


Рис. 5. Применение интерполяции сплайном для спектральной характеристики образца № 9-Л4.

В табл. 2 представлены результаты фильтрации шумов методом интерполяции сплайнами для исследуемых образцов. Преимуществом примене-

ния данного метода является минимальное влияние на положение границ спектрального диапазона и максимума чувствительности МФПУ.

Таблица 2

Параметр	Образец № 3-01		Образец № 9-Л4	
	Экспериментальная характеристика	Результат интерполяции	Экспериментальная характеристика	Результат интерполяции
Максимум чувствительности	1290,2 см ⁻¹ (7,75 мкм)	1307,6 см ⁻¹ (7,65 мкм)	2495,6 см ⁻¹ (4,01 мкм)	2493,6 см ⁻¹ (4,01 мкм)
Коротковолновая граница чувствительности	1954,8 см ⁻¹ (5,12 мкм)	1949,0 см ⁻¹ (5,13 мкм)	2678,2 см ⁻¹ (3,73 мкм)	2678,9 см ⁻¹ (3,73 мкм)
Длинноволновая граница чувствительности	1248,9 см ⁻¹ (8,01 мкм)	1245,6 см ⁻¹ (8,03 мкм)	2436,9 см ⁻¹ (4,10 мкм)	2437,8 см ⁻¹ (4,10 мкм)
СКО, %	—	0,94 %	—	1,15 %

Механизм фильтрации Савицкого-Голея является более адаптированным к расчёту аппроксимированных спектров, так как при его применении имеется возможность оперировать как ШСИ, так и порядком полинома. В проводимых расчётах спектральных характеристик МФПУ с высокими значениями сигнал/шум значение СКО при выборе ШСИ порядка 20—50 точек не превышало 0,5 %, при этом смещение границ чувствительности составляло не более 0,02 мкм. Особый интерес представляет влияние данного типа фильтрации на шумы в спектре чувствительности. На рис. 6 и в табл. 3 представлены результаты фильтрации шумов методом Савицкого-Голея спектральной характеристики чувствительности для образца № 9-Л4.

при этом смещение границ чувствительности составляло не более 0,02 мкм. Особый интерес представляет влияние данного типа фильтрации на шумы в спектре чувствительности. На рис. 6 и в табл. 3 представлены результаты фильтрации шумов методом Савицкого-Голея спектральной характеристики чувствительности для образца № 9-Л4.

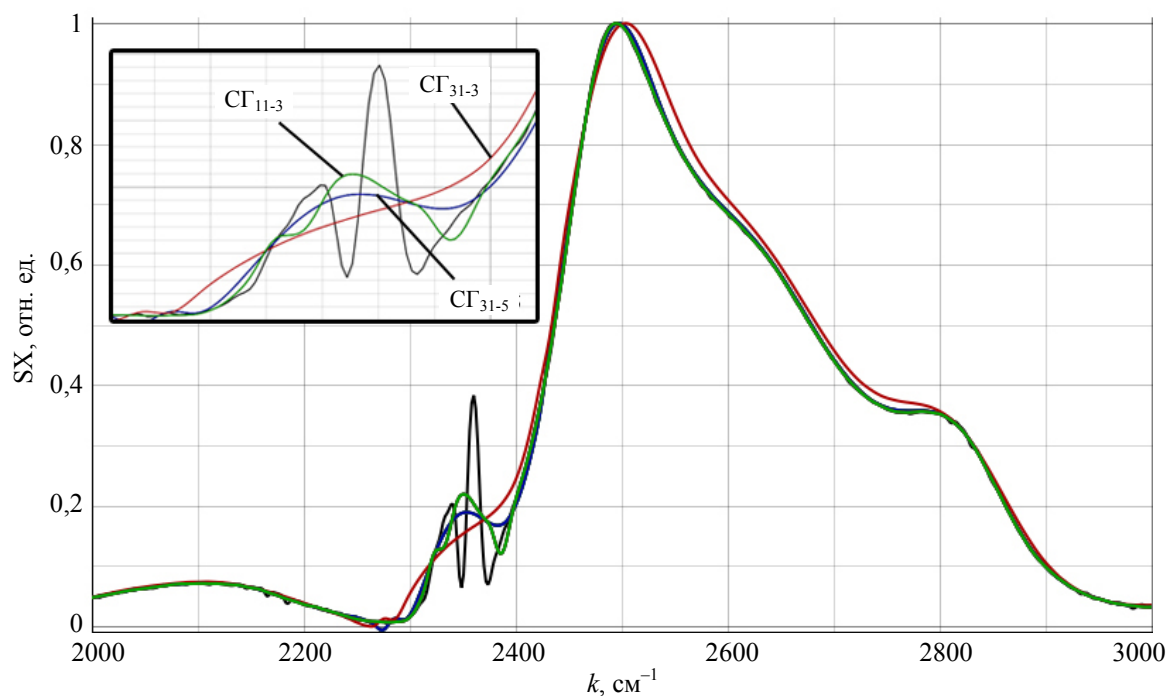


Рис. 6. Сравнение фильтрации методом Савицкого-Голея с различными параметрами для образца № 9-Л4.

Таблица 3

Параметр	Экспериментальная характеристика	Результат фильтрации (ШСИ 31 точка, 5 порядок)	Результат фильтрации (ШСИ 31 точка, 3 порядок)	Результат фильтрации (ШСИ 11 точек, 3 порядок)
Максимум чувствительности	2495,6 см ⁻¹ (4,01 мкм)	2497,5 см ⁻¹ (4,00 мкм)	2503,3 см ⁻¹ (3,99 мкм)	2495,6 см ⁻¹ (4,01 мкм)
Коротковолновая граница чувствительности	2678,2 см ⁻¹ (3,73 мкм)	2679,1 см ⁻¹ (3,73 мкм)	2684,5 см ⁻¹ (3,73 мкм)	2678,0 см ⁻¹ (3,73 мкм)
Длинноволновая граница чувствительности	2436,9 см ⁻¹ (4,10 мкм)	2434,9 см ⁻¹ (4,11 мкм)	2434,0 см ⁻¹ (4,11 мкм)	2436,8 см ⁻¹ (4,10 мкм)
СКО, %	—	0,78 %	0,81 %	1,27 %

Результаты расчетов показывают, что границы и максимум чувствительности после фильтрации шумов претерпевают незначительные изменения, смещаясь на величину не более 0,02 мкм. В случае понижения порядка полинома при фиксированном окне сглаживания (31 точка) происходит смещение максимума спектральной характеристики, которое устраняется уменьшением ширины окна сглаживания. При фильтрации с шириной окна сглаживания 11 точек и 3 порядком полинома значение СКО превышает 1,2 %, что связано с появлением расхождений расчетного и экспериментального графиков на диапазоне повышенного влияния атмосферы.

Таким образом, метод Савицкого-Голея является наиболее оптимальной методикой фильтрации спектральных характеристик чувствительности, не нарушающей диапазон чувствительности и устраняющей влияние шума, благодаря возможности подстройки порядка полинома и ширины окна сглаживания.

Заключение

Проведено сравнение методик фильтрации шума спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств (метод скользящего среднего, метод модифицированного скользящего среднего, метод линейно взвешенного скользящего среднего, интерполяция сплайнами, кривые Безье, фильтрация Савицкого-Голея). Установлено, что наиболее оптимальной методикой фильтрации спектральных характеристик чувствительности является фильтрация Савицкого-Голея, так как она эффективно устраняет влияние шума и некомпенсированного поглощения излучения в атмосфере, не нарушая диапазона чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.

2. Никонов А. В., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 70.
3. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. — М.: Радио и связь, 1997.
4. Arce G. R. *Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach*. — Wiley: New Jersey, 2005.
5. Browne M., Mayer N., Cunmore T. // *Digit. Signal Proc.* 2007. Vol. 17. P. 69.
6. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. — М.: Наука, 1989.
7. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. — М.: Мир, 2001.
8. Savitzky A., Golay M. J. E. // *Analytical Chemistry*. 1964. Vol. 36. No. 8. P. 1627.
9. Madden H. // *Analytical Chemistry*. 1978. Vol. 50. No. 9. P. 1383.
10. Шафаревич И. Р., Ремизов А. О. *Линейная алгебра и геометрия*. — М.: Физматлит, 2009.

Savitzky-Golay smoothing method of FPA photodiodes spectral response

A. V. Nikonov^{1,2}, R. V. Davletshin^{1,2}, N. I. Iakovleva¹, and P. S. Lazarev^{1,2}

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

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received March 18, 2016

Consideration is given to an actual problem in measurements and analysis of the spectral sensitivity in matrix photosensitive devices with low signal-noise ratio, namely, using the noise-smoothing filters without a significant impact on the spectral range of a photosensitive array and position of a maximum sensitivity. In this research, we compare the different calculation procedures (different kinds of moving average, spline interpolation, using Bezier curves, Savitzky-Golay method). The main criteria of the most suitable and useful method is non-change in the spectral range behavior. We choose the best optimal method of spectral response conversion which can be used to calculate parameters of FPAs.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

Keywords: FPA, spectral response, Savitzky-Golay smoothing filter, moving average, cubic spline.

REFERENCES

1. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 47 (2011).
2. A. V. Nikonov, K. O. Boltar, and N. I. Iakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 70 (2012).
3. A. A. Greshilov, V. A. Stakun, and A. A. Stakun, *Mathematical Methods of Predictions Construction* (Radio Svyaz', Moscow, 1997) [in Russian].
4. G. R. Arce, *Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach* (Wiley, New Jersey, 2005).
5. M. Browne, N. Mayer, and T. Cunmore, *Digit. Signal Proc.* **17**, 69 (2007).
6. A. A. Samarskiy and A. V. Gulin, *Numerical Methods* (Nauka, Moscow, 1989) [in Russian].
7. D. Rodgers and Dj. Adams, *Mathematical Basis of Machine Graphics* (Mir, Moscow, 2001) [in Russian].
8. A. Savitzky and M. J. E. Golay, *Analytical Chemistry* **36**, 1627 (1964).
9. H. Madden, *Analytical Chemistry* **50**, 1383 (1978).
10. I. R. Shafarevich and A. O. Remizov, *Linear Algebra and Geometry* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].