

УДК 621.383.4/5

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

Исследование методик фильтрации спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств

А. В. Никонов, Н. И. Яковлева, Р. В. Давлетшин, А. В. Егоров

Исследованы алгоритмы неразрушающей обработки спектральных характеристик чувствительности линейных и матричных фотоприемных устройств (методы взвешенного и экспоненциального скользящего среднего, интерполяция сплайнами, фильтрация методом Савицкого-Голея). Показаны результаты анализа применения алгоритмов фильтрации для спектральных характеристик чувствительности на примере образцов пятиэлементного фотоприемного устройства, предназначенного для бортового ИК Фурье-спектрометра космического аппарата «Метеор-М», и матричного фотоприемного устройства формата 4×576 элементов, имеющего диапазон чувствительности 3,7–4,1 мкм. Анализ результатов показал преимущество фильтрации Савицкого-Голея над стандартными методиками в силу своей вариативности.

Ключевые слова: спектральная характеристика чувствительности, методика фильтрации, фотоприемные устройства, фильтр Савицкого-Голея.

Введение

Ведущим направлением технологии изготовления матричных фотоприемных устройств является контроль их ключевых параметров и характеристик [1–3]. Одной из важнейших характеристик, определяющих такие параметры, как максимум и диапазон чувствительности, является спектральная характеристика чувствительности МФПУ. С помощью спектральных характеристик приемников определяются коэффициенты использования принимаемого излучения и производится пересчет чувствительности при переходе с одних условий работы на другие.

Данная работа посвящена сравнительному исследованию алгоритмов обработки спектраль-

ных характеристик чувствительности фотоприемных устройств различных типов.

Анализ алгоритмов неразрушающей обработки наборов данных

Спектральная характеристика чувствительности представляет собой набор значений чувствительности для заданного пакета длин волн или волновых чисел.

Классической группой методик обработки наборов данных являются методики скользящего среднего [4, 5]. На настоящий момент существует много разновидностей данного типа методик, возникших по причине возможности вариации весов элементов исследуемого набора; наиболее перспективными считаются методики взвешенного и экспоненциального скользящего среднего. Их ключевым недостатком является чрезмерная чувствительность к данным, тем не менее, возможность адаптации методик под изменяющиеся условия зачастую является решающим фактором для выбора данного типа методик.

Принцип алгоритма взвешенного скользящего среднего заключается в усреднении, при котором больший вес присваивается последнему значению прогнозируемого показателя, а меньший – наиболее ранним значениям. В общем случае модель данного метода представляется формулой:

$$WMA(k_i) = \frac{nf(k_i) + (n-1)f(k_{i-1}) + \dots + f(k_{i-j+1})}{n + (n-1) + \dots + 1},$$

Никонов Антон Викторович^{1,2}, начальник НИЦ, зам. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Яковлева Наталья Ивановна¹, главный научный сотрудник НИЦ.

Давлетшин Ренат Валиевич^{1,2}, инженер, студент.

Егоров Александр Васильевич¹, ученый секретарь, доцент, к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел. (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 15 декабря 2016 г.

© Никонов А. В., Яковлева Н. И., Давлетшин Р. В., Егоров А. В. 2017

где $WMA(k_i)$ – расчётное значение чувствительности на волновом числе k_i после пересчёта методом линейно взвешенного скользящего среднего, а параметр n задает сглаживающий интервал – количество значений из используемого набора волновых чисел. Данный механизм был создан для избегания проблемы «удельного веса», возникающей при работе с методом простой скользящей средней, когда всем значениям при расчете присваивается одинаковый вес.

Другой классической модифицированной методикой является методика фильтрации экспоненциального скользящего среднего. Преимуществом данного алгоритма является возможность уменьшить ошибку прогноза за счет снижения эффекта «запаздывания». Как и алгоритм взвешенного скользящего среднего, каждому значению в расчете придается определенный вес, причем большая значимость придается последним значениям рассматриваемого показателя по отношению к значениям более раннего периода. Однако при этом веса убывают по экспоненциальной зависимости, а также никогда не являются равными 0:

$$EMA(k_i) = EMA(k_{i-1}) + K(f(k_i) - EMA(k_{i-1})).$$

Здесь $EMA(k_i)$ и $EMA(k_{i-1})$ – рассчитанные значения чувствительности для пары значений волнового числа (k_i, k_{i-1}) . Коэффициент K , как правило, рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{2}{n+1},$$

где n – число прошлых периодов, рассматриваемых при усреднении. Преимуществом данного алгоритма является его способность с повышенной точностью отобразить динамику исследуемого процесса при выработке прогнозных решений.

В ходе исследования проведен анализ алгоритма интерполяции сплайнами [6]. При использовании данного метода модифицированное значение спектральной характеристики 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 спектральных характеристик чувствительности. Наиболее соответствующими поставленной задаче являются кубические сплайны:

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

при этом учитываются условия непрерывности всех производных расчетной функции, а также принимается во внимание условие интерполяции, при котором исходное и конечное значение исследуемой характеристики в узлах измерений совпадают.

Из приведенных условий выводятся формулы для вычисления коэффициентов сплайна:

$$\begin{aligned} a_i &= SX(k_i), \\ h_i c_{i-1} + 2(h_i + h_{i+1})c_i + h_{i+1}c_{i+1} &= \\ &= 6 \left(\frac{SX_{i+1} - SX_i}{h_{i+1}} - \frac{SX_i - SX_{i-1}}{h_i} \right), \\ d_i &= \frac{c_i - c_{i-1}}{h_i}, \\ b_i &= -\frac{1}{3}h_i c_i - \frac{1}{6}h_i d_i + \frac{SX_i - SX_{i-1}}{h_i} = \\ &= \frac{SX_i - SX_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i(2c_i + c_{i-1})}{6}. \end{aligned}$$

Вычисление коэффициентов c_i проводится методом прогонки по трехдиагональной матрице Якоби [7] с учетом граничных условий $c_0 = c_n = 0$.

В областях обработки экспериментальных данных и фильтрации цифровых сигналов перспективной является методика фильтрации методом Савицкого-Голея [8, 9]. Вместо линейного приближения в окрестности каждой точки измерения применяется аппроксимирующий полином по методу наименьших квадратов. Значение чувствительности при заданном волновом числе k заменяется значением полинома в этой точке:

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

В расчётах используется усредняющий интервал (окно сглаживания), включающий в себя по $(n-1)/2$ точек слева и справа от текущего значения волнового числа. Коэффициенты полинома определяются только размером окна сглаживания и порядком полинома аппроксимации. В данном алгоритме рассчитывается набор коэффициентов $a = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ с использованием критерия минимальной среднеквадратичной оценки по матричному расчёту:

$$(Z^T Z)^{-1} a = -Z^T s x,$$

где $s x$ – вектор измерений, а Z – матрица Вандермонда [10], имеющая размерность $(n+1) \times (2m+1)$,

причем m – ширина окна сглаживания. Из матричного уравнения рассчитываются коэффициенты a_i ($i = 0 \dots n$). Результат фильтрации функции спектральной характеристики определяется в виде свертки:

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

При малых значениях n коэффициенты можно вычислить аналитически, но в случае $n > 3$ (аппроксимирующие полиномы высоких степеней) коэффициенты фильтра определяются матричным расчетом на основе стандартных вычислительных процедур линейной алгебры.

Анализ применения алгоритмов фильтрации для спектральных характеристик чувствительности

Исследование описанных методов проводилось на спектральных характеристиках матричных фотоприемных устройств различных форматов, а

именно, 320×256 и 640×512. Параметром-критерием качества алгоритмов фильтрации являлись значения изменения диапазона чувствительности исследуемых образцов, а также среднеквадратичное отклонение (СКО) экспериментальной и расчётной характеристик. Эффективность методик контролировалась как на спектральных характеристиках малошумящих фотоприемников, так и на спектральных характеристиках, имеющих единичные выбросы, возникающие из-за некомпенсированных атмосферных газов.

Применение фильтрации методом линейно взвешенного скользящего среднего для образца пятиэлементного фотоприемного устройства, предназначенного для бортового ИК Фурье-спектрометра космического аппарата «Метеор-М», показало смещение максимума и границ чувствительности в среднем на 0,03 мкм для ширины спектрального интервала (ШСИ) 10 точек, что соответствовало СКО расчётной и экспериментальной характеристик 0,88 %. При увеличении ШСИ до 20 значений смещение составило 0,05 мкм (см. рис. 1), а СКО увеличилось до 1,82 %.

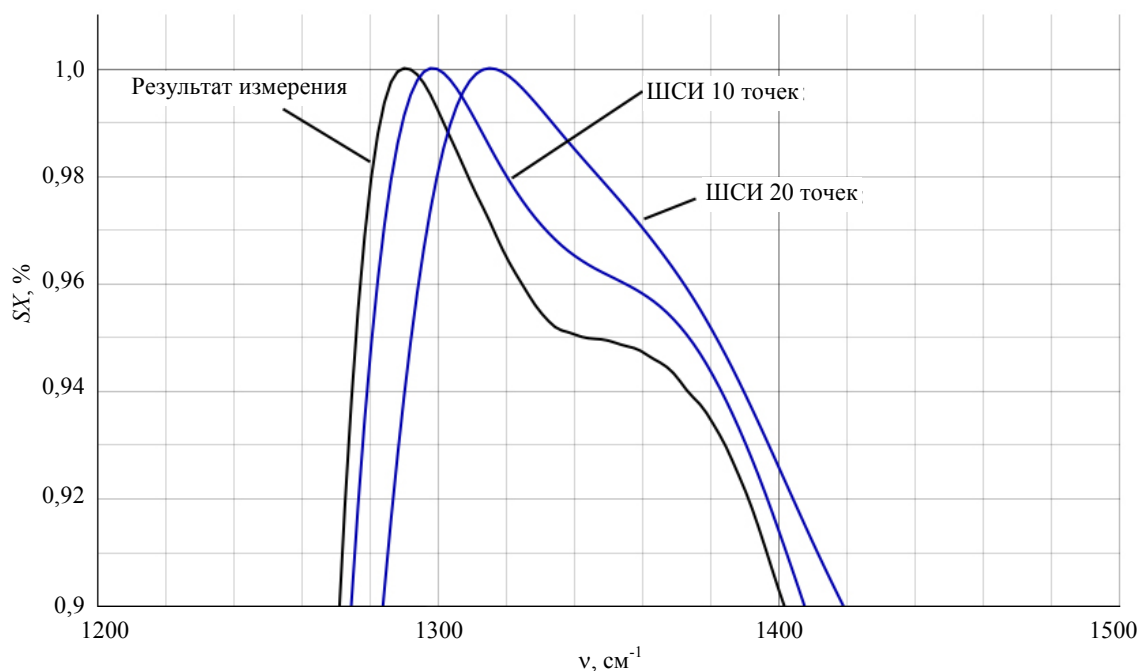


Рис. 1. Влияние фильтрации методом линейно взвешенного скользящего среднего на положение максимума спектральной характеристики образца пятиэлементного фотоприемного устройства.

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

диапазона (см. рис. 2). При использовании данного метода удаётся избавиться от малых значений шумов, но при дальнейшем повышении амплитуды шумов данный алгоритм показывает свою неэффективность.



Рис. 2. Реализация интерполяции сплайном для спектральной характеристики образца пятиэлементного фотоприемного устройства.

Отметим, что 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. 3 представлены результаты фильтрации шумов методом Савицкого-Голея спектральной характеристики чувствительности для образца матричного фотоприемного устройства формата 4×576 элементов, имеющего диапазон чувствительности 3,7–4,1 мкм. При этом приведенные на рис. 4 данные показывают, что алгоритм Савицкого-Голея позволяет эффективно избавиться как от шумов, так и от влияния повышенного количества углекислого газа в диапазоне волновых чисел 2300–2400 см⁻¹.

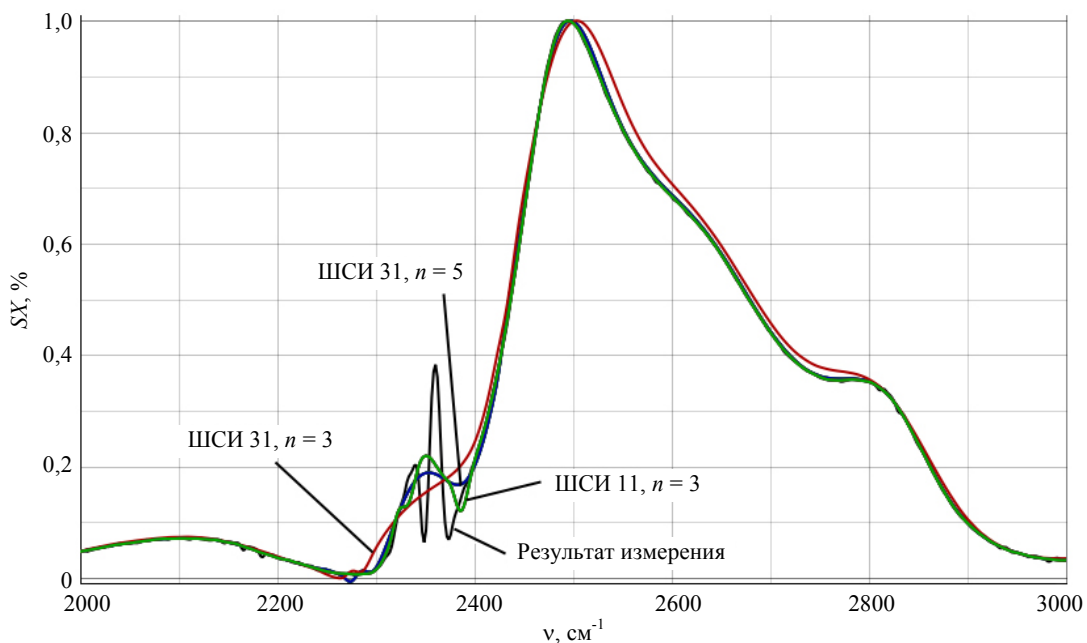


Рис. 3. Результаты применения алгоритма Савицкого-Голея для спектральной характеристики при различных ШСИ и порядке полинома.

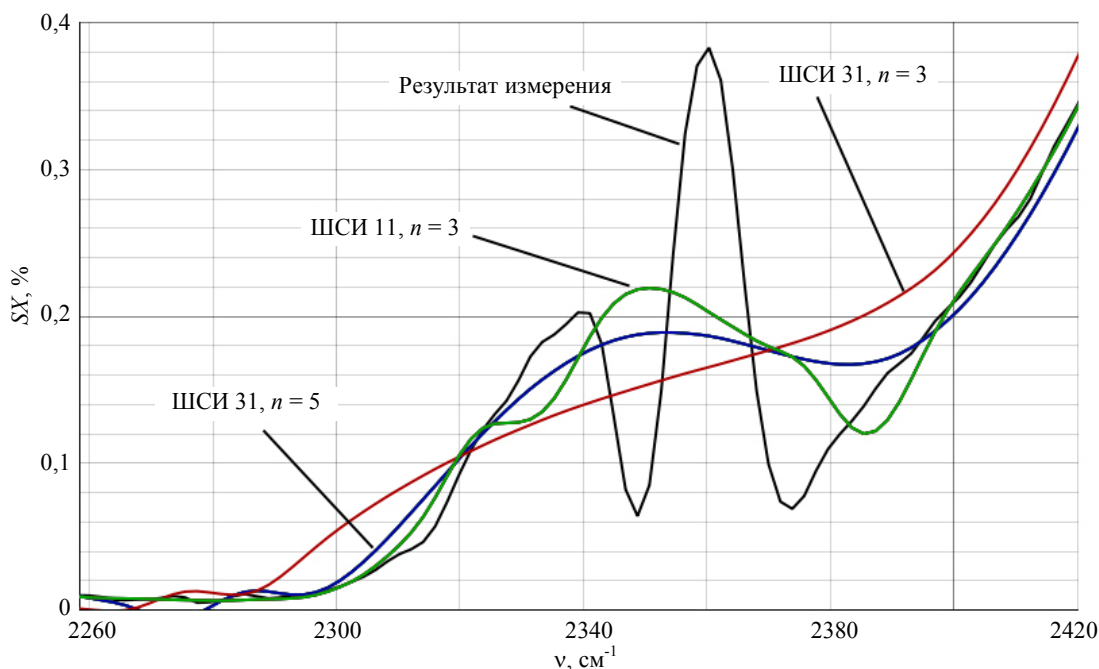


Рис. 4. Результаты применения алгоритма Савицкого-Голея для спектральной характеристики при различных ШСИ и порядке полинома (область выброса CO₂).

В результате применения данного алгоритма границы и максимум чувствительности смещаются на величину не более 0,02 мкм. При понижении порядка полинома при фиксированной ширине окна сглаживания происходит смещение максимума чувствительности. Этот недостаток устраняется последующим уменьшением ширины окна сглаживания.

Таким образом, алгоритм Савицкого-Голея в силу своей вариативности является наиболее подходящим при обработке и пересчете спектральных характеристик чувствительности: алгоритм является неразрушающей методикой (положение границ и максимума чувствительности для «незашумленных» зависимостей остается неизменным), в то же время удается избавиться как от единичных шумовых пиков, так и от влияния низкого соотношения сигнал/шум.

Заключение

В работе проведено сравнительное исследование алгоритмов обработки спектральных характеристик чувствительности фотоприемных устройств различных форматов. Анализ и сопоставление методик показали эффективность нераз-

рушающего алгоритма Савицкого-Голея в силу вариативности его параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 509.
2. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. — М.: Физматкнига, 2012.
4. Arce G. R. Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach. — Wiley: New Jersey, 2005.
5. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. — М.: Радио и связь, 1997.
6. Шафаревич И. Р., Ремизов А. О. Линейная алгебра и геометрия. — М.: Физматлит, 2009.
7. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. — М.: Мир, 2001.
8. Madden H. // Analytical Chemistry. 1978. Vol. 50. No. 9. P. 1383.
9. Savitzky A., Golay M. J. E. // Analytical Chemistry. 1964. Vol. 36. No. 8. P. 1627.
10. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. — М.: Наука, 1989.

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

Different smoothing methods for a spectral response of the FPA photodiodes

A. V. Nikonov^{1,2}, N. I. Iakovleva¹, R. V. Davletshin^{1,2}, and A. V. Egorov¹

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya st., 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 December 15, 2016

Different smoothing methods (weighted moving average, exponential moving average, spline interpolation, Savitzky-Golay method) of FPAs spectral response curves were researched. Results of analysis are presented for spectral response curves of a photodetector with 5 photosensitive elements, which is used in a Fourier spectrometer into the Meteor-M satellite at the polar orbit. Also, a spectral response of a photodetector with 4×576 photosensitive area was the aim for smoothing methods. The Savitzky-Golay method was chosen as of the most suitable and useful method of the spectral response conversion.

Keywords: spectral response, filter methods, FPA, Savitzky-Golay smoothing filter.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva and A. M. Filachev, Usp. Prikl. Fiz. **2**, 509 (2014).
2. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko and A. M. Filachev, Prikl. Fiz. **2**, 47 (2011).
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-state Photoelectronics. Photoresistors and Photodetectors*. (Fizmatkniga, Moscow, 2012) [in Russian].
4. G. R. Arce, *Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach* (Wiley, New Jersey, 2005).
5. A. A. Greshilov, V. A. Stakun, and A. A. Stakun, *Mathematical Methods of Forecasting* (Radio and Communications, Moscow, 1997).
6. I. R. Shafarevich and A. O. Remizov, *Linear Algebra and Geometry* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].
7. D. Rodgers and D. J. Adams, *Mathematical Basis of Machine Graphics* (Mir, Moscow, 2001) [in Russian].
8. H. Madden, Analytical Chemistry. **50** (9), 1383 (1978).
9. A. Savitzky and M. J. E. Golay, Analytical Chemistry **36**, 1627 (1964).
10. A. A. Samarskiy and A. V. Gulin, *Numerical Methods* (Nauka, Moscow, 1989) [in Russian].