

УДК 621.383
EDN: MPKSTR

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp

Эффективность применения корректора граничной частоты фильтра высоких частот, используемого в сканирующих крупноформатных фотоприёмных устройствах инфракрасного диапазона (ИК ФПУ)

© В. В. Абилов, В. А. Стрельцов, В. В. Савцов*

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: vlvsav@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2025; после доработки 27.01.2026; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 2.2.6

Рассматривается принципиальное устройство БИС считывания сканирующих фотомодулей (ФМ) инфракрасного диапазона (ИК) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН). Обозначена роль и влияние рекурсивного фильтра высоких частот (ФВЧ) во входных ячейках (ВЯ) БИС считывания на пороговые характеристики ФМ. Приведено математическое описание цифровой коррекции граничной частоты ФВЧ во входной ячейке. Описано устройство и принцип работы обучаемого классификатора, способного разделять ВЗН-каналы на группы по спектральной плотности мощности шума (СПМШ). Проведена коррекция граничной частоты ФВЧ ВЯ БИС считывания для большого количества ВЗН-каналов с разной СПМШ. Рассчитана эффективность применения этой коррекции для увеличения отношения сигнал/шум с учётом проведения стандартной для сканирующих ИК ФМ внутрикадровой обработки. Установлено, что пороговые характеристики без проведения оконной фильтрации в среднем улучшаются на 2,5 %, а с её проведением – всего на 1 %. Отмечено, что при большом количестве ВЗН-каналов с низкочастотным шумом коррекция может ухудшить пороговые характеристики на 1,5 %.

Ключевые слова: пороговые характеристики, фотомодуль, инфракрасный диапазон, режим временной задержки и накопления, шум, отношение сигнал/шум, внутрикадровая обработка, спектральная плотность мощности шума, фильтр верхних частот, граничная частота, многоклассовая классификация данных с независимыми признаками.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-31-38

Введение

Крупноформатные фотоприёмные устройства инфракрасного диапазона (ИК ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) активно используются в составе систем космического мониторинга Земли. Ключевым элементом таких ИК ФПУ являются инфракрасные фотомодули (ФМ), представляющие из себя большую интегральную схему (БИС) считывания, состыкованные с матрицей фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе

теллурида кадмия-ртути. Типовая блок-схема БИС считывания таких ФМ представлена на рис. 1.

Задача БИС считывания – принимать сигналы от МФЧЭ, которая подключена к БИС через микроконтакты (рис. 1, блок 1), и суммировать эти сигналы в определённой временной последовательности, то есть реализовывать режим ВЗН.

Когда изображение равномерно перемещается сканером по фотомодулю, сигналы последовательно поступают с ФЧЭ (от 1 до 6) во

входные ячейки (ВЯ) БИС считывания. В этих ячейках происходит первичное накопление и высокочастотная фильтрация сигналов с помощью схем с переключаемыми конденсаторами (рис. 1, блок 2). Высокочастотная фильтрация увеличивает входной динамический диапазон за счёт вычитания разброса постоянной неинформативной составляющей сигналов с МФЧЭ. Затем эти сигналы коммутируются на каждый из входов (от 1 до 1152) ВЗН-регистра (рис. 1, блок 3). В ВЗН-регистре происходит взвешенное суммирование слага-

емых (сигналов), поступающих в разные моменты времени. Работа ВЗН-регистра считается завершённой, когда все 6 сигналов поступают на его входы с равными коэффициентами взвешивания $1/6$. В этом случае работу ВЗН-регистра можно рассматривать как операцию усреднения. Целью такого усреднения является значительное снижение уровня шумов и помех, повышение равномерности и стабильности сигналов от МФЧЭ, а также увеличение динамического диапазона на выходе.

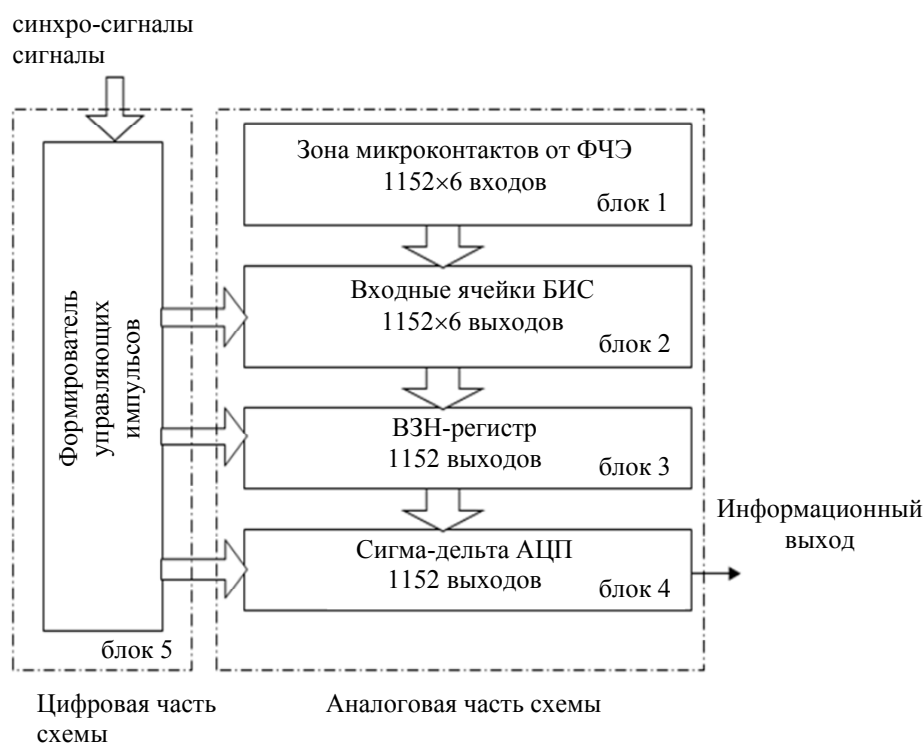


Рис. 1. Типовая блок-схема БИС считывания сканирующих ИК ФМ

Дальнейшие операции, выполняемые в блоке 4 (см. рис. 1), включают в себя:

- аналого-цифровое преобразование (АЦП);
- коммутацию сигналов на информационные выходы БИС.

Координация работы БИС и отбраковка дефектных ФЧЭ осуществляются цифровым блоком формирователя управляющих импульсов (рис. 1, блок 5) [1].

Так как низкочастотный шум значительно ухудшает точность измерения сигнала, получаемого на выходе ИК ФПУ [2], при том, что подавляющая часть спектральной плотности мощности сигнала от малоразмерных объектов, являющихся целевыми объектами

обнаружения для рассматриваемых ИК ФПУ, сосредоточена в области нижних частот, естественным образом возникает идея о необходимости коррекции граничной частоты $f_{\text{гран}}$ фильтра верхних частот ВЯ БИС считывания (далее по тексту – АС фильтр) (рис. 1, блок 2) в сторону её уменьшения. Проведение исследований по подбору оптимальных параметров математического рекурсивного фильтра, обеспечивающего уменьшение исходной граничной частоты АС фильтра со 120 Гц до 30 Гц, описанных в работе [3], показало значительный прирост отношения сигнал/шум (до 9 % для фильтра первого порядка и до 39 % для фильтра второго порядка). Однако в данной работе подбор параметров проводился

всего для одного ВЗН-канала, обладающего приближенным к «белому» спектром шума, хотя в той же работе [3] отмечено, что в реальном ИК ФПУ присутствует большое количество ВЗН-каналов с не «белым» спектром шума, эффективность фильтрации для которых значительно отличается. В связи с этим становится актуальным проведение исследования зависимости эффективности коррекции граничной частоты фильтра верхних частот БИС считывания в контексте увеличения отношения сигнал/шум, для большого количества ВЗН-каналов с различным распределением спектральной плотности мощности шума (СПМШ), чему и посвящена данная работа.

Коррекция граничной частоты

Процедура коррекции граничной частоты АС фильтра подразумевает применение к выходным изображениям ИК ФПУ комбинации из двух рекурсивных цифровых фильтров первого порядка, которые последовательно сначала выпрямляют амплитудно-частотную характеристику (Ф1), после чего она подвергается высокочастотной фильтрации (Ф2), но уже с новой требуемой граничной частотой (рис. 2). АЧХ результирующего фильтра (Ф) (красная кривая) вычислена как произведение АЧХ Ф1 и АЧХ Ф2. Скорректированная при помощи фильтра Ф АЧХ АС фильтра отображена фиолетовой кривой («Рез. АЧХ» на рис. 2).

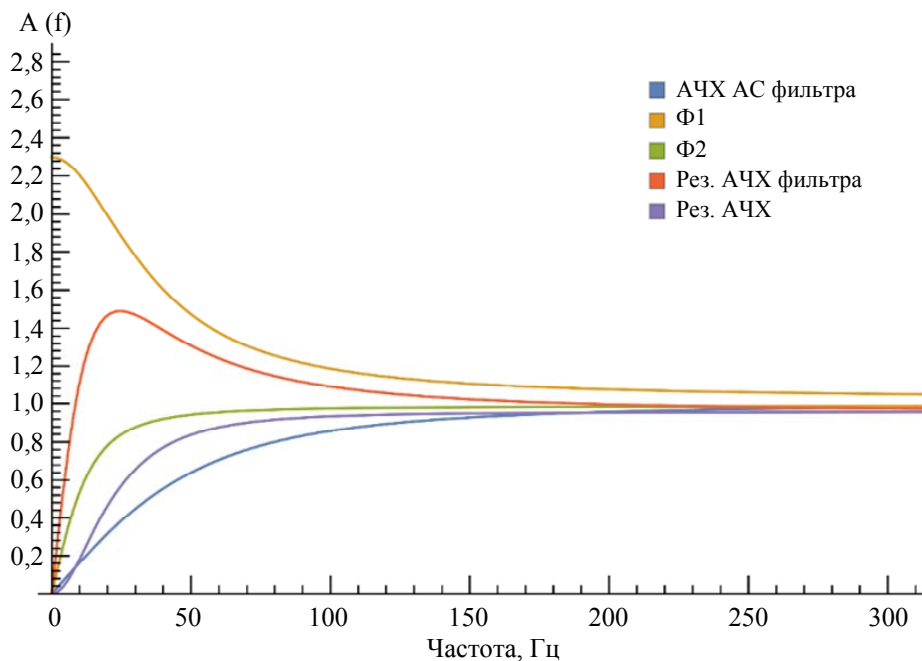


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики изначального АС фильтра, усилителя нижних частот (Ф1), ФВЧ с новой граничной частотой (Ф2), результирующего фильтра второго порядка (Ф), выходных данных после проведённой коррекции (Рез. АЧХ.)

Рекурсивный фильтр первого порядка описывается формулой:

$$y[n] = a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + b_1 y[n-1], \quad (1)$$

коэффициенты усилителя нижних частот Ф1: $a_0 = 1,061906$, $a_1 = -0,95238$, $b_1 = +0,95238$;

коэффициенты ФВЧ Ф2: $a_0 = +\alpha$, $a_1 = -\alpha$, $b_1 = +\alpha$, $\alpha = 0,975$.

Результирующий фильтр второго порядка Ф задаётся формулой:

$$y[n] = a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + a_2 x[n-2] + b_1 y[n-1] + b_2 y[n-2] \quad (2)$$

со следующими коэффициентами:

$$a_0 = 0,975, \quad a_1 = -1,84944, \quad a_2 = 0,874438, \\ b_1 = 1,92738, \quad b_2 = -0,928571.$$

После проведения такой частотной коррекции увеличивается сигнал от малоразмерного объекта, так как большая часть его спектральной плотности мощности сосредоточена именно в области низких частот. Шум также

возрастает, однако в случае равномерного или высокочастотного шума это возрастание не пропорционально возрастанию сигнала, вследствие чего отношение сигнал/шум увеличивается, а пороговые характеристики улучшаются. Но если среди ВЗН-каналов преобладают низкочастотные шумы, такая обработка может либо оказаться неэффективной, либо ухудшить пороговые характеристики.

Классификатор СПМШ ВЗН-каналов

Для определения эффективности коррекции граничной частоты АС фильтра для различных типов СПМШ необходимо проклассифицировать большое количество ВЗН-каналов по четырем основным классам шумов, описанным в работе [4] (элементарные классы):

- 1) шум стандартных ВЗН-каналов («Белый»);
- 2) шум с преобладающей высокочастотной составляющей (Высокочастотный);
- 3) шум с избыточными низкочастотными составляющими (Низкочастотный);
- 4) шум с подъёмом в окрестности 1/3 частоты дискретизации (ВЗН-шум).

Для автоматического осуществления идентификации СПМШ был разработан обучаемый классификатор, позволяющий определить вероятность принадлежности ВЗН-канала к одной из вышеописанных групп.

Исходными данными для классификатора являются зависимости СПМШ ВЗН-каналов от частоты, прошедшие предварительную цифровую обработку, выполняемую в 3 этапа [5]:

- 1) оконная фильтрация с использованием функции медианы в окне радиуса 2;
- 2) оконная фильтрация с использованием функции среднее арифметическое значение в окне радиуса 5;
- 3) нормировка – установление, чтобы среднее значение данных было равно единице.

На основе полученных после преобразования данных вычисляется 3 коэффициента (x_1, x_2, x_3), каждый из которых характеризует принадлежность ВЗН-канала к одной из групп:

1) Коэффициент наклона в низкочастотной области определяется как коэффициент наклона прямой, построенной методом наименьших квадратов (МНК) по данным из области [50; 500] Гц.

2) Коэффициент наклона в основной части СПМШ определяется как коэффициент наклона прямой, построенной МНК по данным из области [500; 1177] $\cup$ [1377; 1915] Гц.

3) Коэффициент, характеризующий ВЗН-шум, определяется следующим образом: по данным из области $\Delta = [1177; 1377]$ Гц при помощи МНК рассчитываются коэффициенты аппроксимирующей параболы. После этого, в зависимости от значения коэффициента перед старшей степенью параболы (a), определяется значение коэффициента ВЗН-шума:

- а) если $a > 0$, то параметр равен 0;
- б) если $a < 0$ и положение максимума параболы находится вне диапазона области Δ , то параметр равен 0;
- в) в противном случае, параметр равен значению коэффициента корреляции данных из области Δ с дискретизированной аппроксимирующей параболой.

Обучение классификатора происходит посредством вычисления характеризующих коэффициентов СПМШ, для которых вручную определён класс, и построения на их основе функций плотности вероятности для каждого класса (рис. 3):

1) Для каждого элементарного класса C_k (белый, высокочастотный, низкочастотный, ВЗН; k – индекс параметра) и для каждого характеризующего коэффициента x производится оценка ширины распределения как медианное абсолютное отклонение, приведенное к значению СКО – $\sigma_{k,x}$.

2) Для каждого элементарного класса C_k и для каждого коэффициента x формируется плотность распределения данного коэффициента: итоговое значение плотности $\rho_{k,x}$ является суммой гауссоид со средним значением, равным значению параметра, и СКО, равным $\sigma_{k,x} \times n$, $n = 1/4$.

3) Полученные плотности распределения нормируются: $\int_{-\infty}^{\infty} \rho_{k,x}(x) dx = 1$.

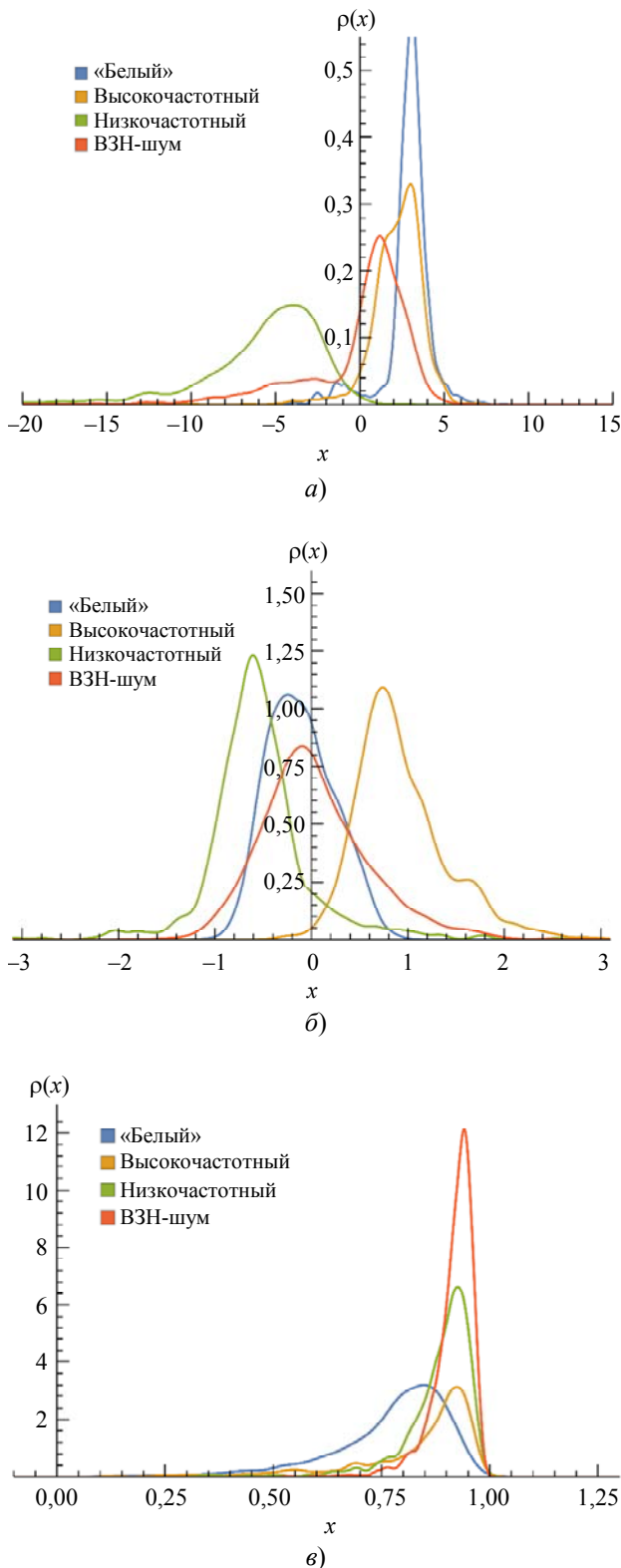


Рис. 3. Функции плотности вероятности каждого элементарного класса СПМШ: а) для коэффициента наклона низкочастотных шумов, б) для коэффициента наклона основной части СПМШ, в) для коэффициента корреляции преобработанных данных и аппроксимирующей параболы

После вычисления характеризующих коэффициентов классифицируемой СПМШ, по

формуле Байеса [6] вычисляется вероятность её принадлежности одному из элементарных классов:

$$P(C_k | \vec{x}) = \frac{P(C_k) \cdot P(\vec{x} | C_k)}{P(\vec{x})}, \quad (3)$$

где $\vec{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ – вектор со значениями параметров (коэффициентов);

$P(C_k)$ – вероятность встречи элементарного класса C_k ;

$P(\vec{x} | C_k)$ – вероятность того, что значение вектора со значениями коэффициентов, равными $\vec{x}$ при условии, что входные данные относятся к классу C_k .

Априорная вероятность гипотезы C_k вычисляется по формуле:

$$P(C_k) = N_k / N \quad (4)$$

где N_k – количество выборок, в которых наблюдался элементарный класс k среди обучающей выборки;

N – общее количество обучающих выборок.

Ввиду независимости коэффициентов друг от друга, условная вероятность наблюдения коэффициентов $\vec{x}$ при условии, что они относятся к элементарному классу C_k вычисляется по формуле:

$$P(\vec{x} | C_k) = \prod_{i=1}^3 \int_{|\xi_i - x_i| \leq \sigma_i \cdot n} \rho_k(\xi_i) d\xi_i. \quad (5)$$

Вероятность $P(\vec{x})$ вычисляется по формуле полной вероятности события, зависящего от нескольких несовместных гипотез:

$$P(\vec{x}) = \sum_{k=1}^4 P(\vec{x} | C_k) \cdot P(C_k). \quad (6)$$

Эффективность применения корректора граничной частоты АС фильтра для ВЗН-каналов с различными СПМШ

При помощи разработанного классификатора были разделены на группы 5760 ВЗН-

каналов из состава одной линейки образца сканирующего ИК ФПУ. При помощи СПМШ этих ВЗН-каналов были сгенерированы временные реализации шума длиной 1937 выборок для каждого из каналов, таким образом, образовав кадр, являющийся имитацией выходного низкофонового изображения ИК ФПУ. Используя шумовой кадр как основу, формируется серия кадров, каждый из которых представляет собой суперпозицию временных реализаций шума и изображения малоразмерного объекта, сфокусированного на один из ВЗН-каналов.

Получившаяся серия кадров параллельно подвергается двум способам цифровой обработки: стандартной (двухточечная коррекция и квазисогласованная с сигналом от малоразмерного объекта оконная фильтрация [7]) и последовательно применённой коррекции граничной частоты и стандартной обработки. Из обработанных кадров рассчитывается отношение сигнал/шум (ОСШ) для каждого ВЗН-канала, после чего находится отношение значений ОСШ, полученных из серии кадров, подвергнутых стандартной обработке с корректором граничной частоты, к значениям ОСШ, полученным из серии кадров, подвергнутых только стандартной обработке. Значения этих отношений характеризуют эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра для улучшения пороговых характеристик каждого отдельного ВЗН-канала с учётом их взаимного расположения в линейке (за счёт оконной фильтрации).

Имея информацию о том, к какой группе по форме СПМШ относится каждый ВЗН-канал, можно соотнести эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра со спектром шума и его распространённостью в реальном образце сканирующего ИК ФПУ (рис. 4).

Полученные результаты показывают, что применение корректирующего фильтра:

- а) для «белого» шума увеличивает ОСШ на 1 %;
- б) для высокочастотного шума увеличивает ОСШ на 2 %;
- в) для низкочастотного шума уменьшает ОСШ на 1,5 %;
- г) для ВЗН-шума увеличивает ОСШ на 1,3 %.

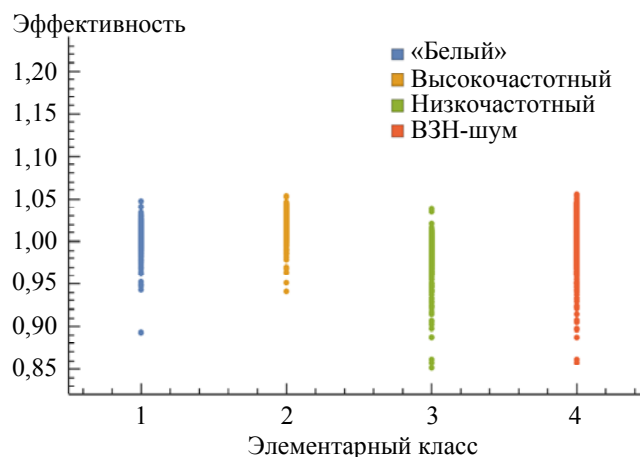


Рис. 4. Эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра для различных типов СПМШ с учётом квазисогласованной оконной фильтрации

Однако, если не проводить оконную фильтрацию выходных изображений, ограничив стандартную обработку только двухточечной коррекцией, то эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра будет распределена как показано на рис. 5.

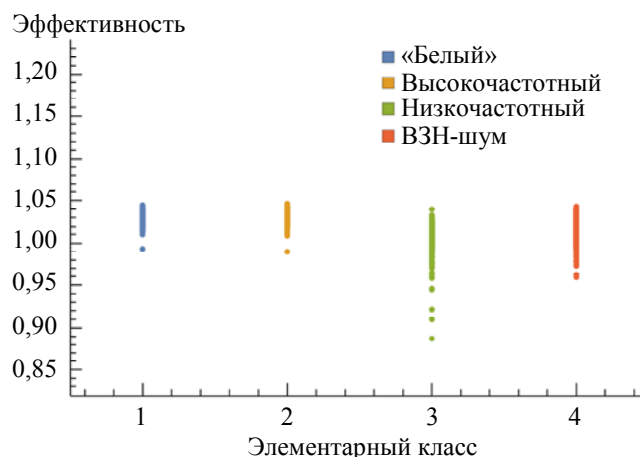


Рис. 5. Эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра для различных типов СПМШ без учёта квазисогласованной оконной фильтрации

В этом случае применение корректирующего фильтра:

- а) для «белого» шума увеличивает ОСШ на 3 %;
- б) для высокочастотного шума увеличивает ОСШ на 3 %;
- в) для низкочастотного шума увеличивает ОСШ на 1 %;
- г) для ВЗН-шума увеличивает ОСШ на 2,3 %.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что эффективность коррекции граничной частоты АС фильтра в среднем незначительно улучшает пороговые характеристики (до 2,5 %), если оценивать их по исходным выходным изображениям ИК ФПУ. Однако, за счёт «размытия» временных выборок между ВЗН-каналами при применении оконной фильтрации, часто применяющейся с той же самой целью улучшения пороговых характеристик, этот эффект практически нивелируется (до 1 %). Также, в случае преобладания в фотомодуле низкочастотных шумов, коррекция граничной частоты АС фильтра может ухудшить его пороговые характеристики (до 1,5 %), что указывает на высокую специфичность этого вида предобработки выходных сигналов ИК ФПУ.

Заключение

В настоящей работе было проведено исследование влияния формы спектральной плотности мощности шума ВЗН-каналов ИК ФПУ на эффективность коррекции граничной частоты фильтра верхних частот БИС считывания в контексте увеличения отношения сигнал/шум с учётом применения стандартной внутрикадровой цифровой обработки, включающей в себя двухточечную коррекцию неравномерности чувствительности ВЗН-каналов и квазисогласованную с сигналом от малоразмерного объекта оконную фильтрацию. Для определения принадлежности графиков СПМШ ВЗН-каналов к одному из четырёх основных типов был разработан обучаемый классификатор, позволяющий на основании вручную проклассифицированных данных вычислить вероятность принадлежности классифицируемого ВЗН-канала к одной или сразу нескольким группам. При помощи классификатора было проидентифицировано большое количество ВЗН-каналов реального образца сканирующего ИК ФПУ, после чего при помощи их СПМШ была сгенерирована серия кадров, содержащих изображения малоразмерного объекта на каждом из исследуемых ВЗН-каналов. После параллельно проведённой внутрикадровой обработки этих кад-

ров с коррекцией граничной частотой АС фильтра и без неё было произведено сравнение эффективности этой коррекции для улучшения пороговых характеристик для различных типов ВЗН-каналов:

а) в случае применения оконной фильтрации коррекция граничной частоты АС фильтра в среднем увеличивает ОСШ на 1 %;

б) в случае без применения оконной фильтрации коррекция граничной частоты АС фильтра в среднем увеличивает ОСШ на 2,5 %.

Также было показано, что в случае преобладания в фотомодуле ВЗН-каналов с низкочастотными шумами коррекция граничной частоты АС фильтра уменьшает ОСШ на 1,5 %, что в совокупности с низкой эффективностью при применении оконной фильтрации указывает на высокую специфичность этого вида предобработки выходных сигналов ИК ФПУ и невозможность использовать его без предварительной оценки шумовых характеристик используемого прибора. В случае же преобладания в приборе шумов с равномерным или высокочастотным спектром эта коррекция позволяет немного улучшить пороговые характеристики, что тем не менее является удовлетворительным результатом для ИК ФПУ такого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочков В. Д., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 65–70.
2. Деомидов А. Д., Козлов К. В., Полесский А. В., Соломонова Н. А., Фирсенкова Ю. А. / Прикладная физика. 2015. № 4. С. 102–108.
3. Стрельцов В. А., Абилов В. В., Филиппов С. О. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 267–276.
4. Абилов В. В., Стрельцов В. А. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 55–62.
5. Press W. H., et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3rd ed. – Cambridge University Press, 2007.
6. Zhang M.-L., Pena Jos'e M., Robles Victor / Information Sciences 2009. Vol. 179. № 19. P. 3218–3229.
7. Дражников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. / Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 566–572.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp

Efficiency of applying a high-pass filter cutoff frequency corrector used in the infrared focal-plane array with time delay integration mode (IR-FPA)

V. V. Abilov, V. A. Streltsov, and V. V. Savtsov*

RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

*E-mail: vlvsav@yandex.ru

Received 26.12.2025; revised 27.01.2026; accepted 20.02.2026

The fundamental design of the readout integrated circuit (ROIC) of scanning infrared (IR) photomodules (PM) with the time delay integration mode (TDI) is considered. The role and influence of the recursive high-pass filter (HPF) in the input cells (IC) of the readout integrated circuit on the threshold characteristics of the PM are outlined. A mathematical description of the digital correction of the HPF cutoff frequency in the input cell is given. The design and operating principle of a trainable classifier capable of dividing TDI-channels into groups based on the noise power spectral density (NPSD) are described. The cutoff frequency of the HPF of the IC has been corrected for a large number of TDI-channels with different NPSD. The efficiency of applying this correction to increase the signal-to-noise ratio has been calculated, taking into account the standard intra-frame processing for scanning IR PM. It was found that threshold characteristics without window filtering improve by an average of 2.5 %, while with it, they improve by only 1 %. It was noted that with a large number of TDI-channels with low-frequency noise, the digital correction of the HPF cutoff frequency can degrade threshold characteristics by 1.5 %.

Keywords: threshold characteristics, photomodule, infrared range, time delay and integration mode, noise, signal-to-noise ratio, intra-frame processing, noise power spectral density, high-pass filter, cutoff frequency, multi-label classification.

REFERENCES

1. Bochkov V. D., Drajnicov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V., and Solyakov V. N., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **2** (1), 65–70 (2014) [in Russian].
2. Deomidov A. D., Kozlov K. V., Polesskiy A. V., Solomonova N. A., and Firsenkova U. A., Applied Physics, № 4, 102–108 (2015) [in Russian].
3. Streltsov V. A., Abilov V. V., and Filippov S. O., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **7** (3), 267–276 (2019) [in Russian].
4. Abilov V. V. and Streltsov V. A., Applied Physics, № 3, 55–62 (2023) [in Russian].
5. Press W. H., et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3er ed. Cambridge University Press, 2007.
6. Zhang M.-L., Pena Jos'e M., and Robles Victor, Information Sciences **179** (19), 3218–3229 (2009).
7. Drajnicov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V., and Solyakov V. N., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **3** (6), 566–572 (2015) [in Russian].

Об авторах

Абилов Владислав Владимирович, к.т.н., главный специалист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: Abilov.V.V.@yandex.ru SPIN-код: 2756-7990, AuthorID: 1233856

Стрельцов Вадим Александрович, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: vadim.streltsov@phystech.edu SPIN-код: 7411-5614, AuthorID: 1242995

Савцов Владимир Валериевич, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: vlvsav@yandex.ru