

УДК 621.383
EDN: KLYFBG

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



Способ деселекции дефектных фоточувствительных элементов, наиболее уменьшающих отношение сигнал/шум в каналах фотомодуля инфракрасного диапазона с режимом временной задержки и накопления

О. В. Гапонов, В. И. Бурлаков, В. В. Савцов

Разработан новый способ деселекции, относящийся к средствам обнаружения дефектов в фотомодулях инфракрасного диапазона (ИК ФМ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН). Разработанный способ применяется для обнаружения и деселекции дефектных фоточувствительных элементов (ФЧЭ), наиболее уменьшающих отношение сигнал/шум (ОСШ) в каналах ИК ФМ. Такой способ увеличивает ОСШ каналов ИК ФМ, что повышает способность ИК ФМ обнаруживать маломощные оптические сигналы инфракрасного диапазона. Данный результат обеспечивается тем, что обнаружение дефектных ФЧЭ достигается обработкой сигналов и шумов всех ФЧЭ с использованием критерия детектирования ФЧЭ, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ. Данный способ является общим правилом детектирования дефектных ФЧЭ, так как критерий анализирует влияние всех ФЧЭ на ОСШ каналов ИК ФМ, в том числе и наиболее шумящих элементов.

Ключевые слова: фотоэлектроника, оптико-электронные устройства, инфракрасный диапазон, фотомодуль, режим временной задержки и накопления, шум, деселекция, отношение сигнал/шум, фоточувствительные элементы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-1-47-61

Введение

В настоящее время известен способ деселекции (отключения) наиболее шумящих ФЧЭ в каналах ИК ФМ с режимом ВЗН. Способ позволяет повысить ОСШ в каналах ИК ФМ. Эффективность и суть данного способа были

продемонстрированы в работах [1–5]. Однако в результате исследований было обнаружено, что рассматриваемый способ деселекции можно модифицировать для большего повышения ОСШ каналов ИК ФМ в случае, когда в каналах фотоприёмника содержатся неоднородные по чувствительности ФЧЭ. Перед описанием существующего способа деселекции и возможностей его модификации необходимо рассмотреть элементные цепочки каналов ИК ФМ с режимом ВЗН, в состав которых входят ФЧЭ. Для этого проанализируем представленную на рисунке 1 упрощённую схему типового канала ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН, где N – количество элементных цепочек в канале фотоприёмника, одинаковое для каждого канала ИК ФМ и такое, что $N \in Z^+$ и $N \geq 2$. M – количество каналов в фотоприёмнике, такое, что $M \in Z^+$.

Гапонов Олег Владимирович, инженер 2 кат., аспирант.

E-mail: gapn@yandex.ru

Бурлаков Владислав Игоревич, инженер-программист 1 кат., аспирант.

E-mail: vlad-burlakov@mail.ru

Савцов Владимир Валериевич, инженер 2 кат., аспирант. АО «НПО «Орион».

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

Статья поступила в редакцию 5.12.2023

После доработки 29.12.2023

Принята к публикации 19.01.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11.

© Гапонов О. В., Бурлаков В. И., Савцов В. В., 2024

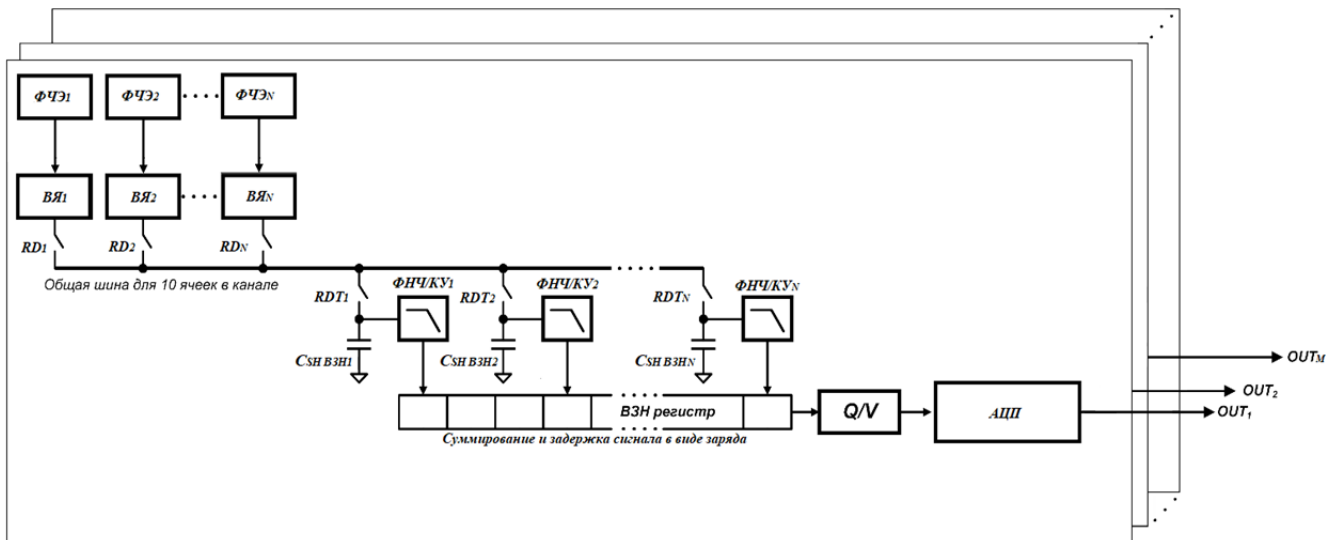


Рис. 1. Упрощённая схема типового канала ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН

В каждом канале ИК ФМ имеются N ФЧЭ $\Phi\text{ЧЭ}_1, \dots, \Phi\text{ЧЭ}_N$ и N входных ячеек (ВЯ) $\text{ВЯ}_1, \dots, \text{ВЯ}_N$, которые расположены вдоль направления сканирования, одна общая для всех ВЯ коммутационная шина с ключами $\text{RD}_1, \dots, \text{RD}_N$ и $\text{RDT}_1, \dots, \text{RDT}_N$, N конденсаторов выборки-хранения $C_{\text{SH ВЗН}1}, \dots, C_{\text{SH ВЗН}N}$, N блоков $\Phi\text{НЧ/КУ}_1, \dots, \Phi\text{НЧ/КУ}_N$ для подстройки либо фильтра нижней частоты (ФНЧ), либо коэффициента усиления (КУ), один регистр для суммирования и задержки сигнала в форме заряда (ВЗН-регистр), а также один зарядочувствительный усилитель Q/V . Если фотоприёмник является цифровым, то после усилителя Q/V устанавливается аналого-цифровой преобразователь.

В режиме ВЗН выходной сигнал одного канала представляет собой сумму сигналов и шумов всех ФЧЭ, прошедших через ВЯ, конденсаторы выборки-хранения и блоки подстройки ФНЧ/КУ.

В канале каждому $\Phi\text{ЧЭ}_i$ ($1 \leq i \leq N$) соответствуют свои ВЯ_i , ключи RD_i и RDT_i , конденсатор выборки-хранения $C_{\text{SH ВЗН}i}$ и блок $\Phi\text{НЧ/КУ}_i$. Указанная последовательность элементов и есть элементная цепочка. Итого в каждом канале ИК ФМ формата $N \times M$ содержатся N элементных цепочек. Далее элементные цепочки будут обозначаться как цепочки.

Необходимо отметить, что невозможно определить, какой именно элемент цепочки избыточно шумит. Невозможность связана с тем, что даже если переключить ИК ФМ из режима ВЗН в режим «bypass», когда в канале

измеряется сигнал или шум только одного ФЧЭ, то выходной сигнал канала – это сигнал ФЧЭ, прошедший через ВЯ, конденсатор выборки-хранения и блок подстройки ФНЧ/КУ. Поэтому не представляется возможным выделить в выходном сигнале составляющую конкретного элемента цепочки.

Заметим, что под деселекцией дефектных элементов подразумевается деселекция цепочек с дефектными элементами. Отметим, что проводить деселекцию дефектных элементов в цепочке невозможно, поскольку цепочка представляет собой последовательное соединение элементов. Если отключить хотя бы один элемент цепочки – вся цепочка будет отключена. Поэтому проводится деселекция цепочек с дефектными элементами, а не деселекция дефектных элементов в цепочке. Деселекция цепочек выполняется закрытием ключей RD_i и RDT_i .

Существующий способ [1–5] предлагает за счёт деселекции выявленных наиболее шумящих цепочек увеличить ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН, что позволяет повысить способность данного вида фотоприёмника обнаруживать маломощные оптические сигналы ИК-диапазона. Обнаружение наиболее шумящих цепочек каналов ИК ФМ осуществляется обработкой сигналов и шумов элементных цепочек каналов ИК ФМ с использованием критерия детектирования наиболее шумящих цепочек. Детектирование наиболее шумящих цепочек каналов фотоприёмника и их последующее отключение осуществляются

после получения массивов многократных прямых измерений напряжений сигналов и шумов элементных цепочек каналов ИК ФМ, измерения выполняются в режиме «*bypass*» [1–4] ИК ФМ. Измерения проводят после установки абсолютно чёрного тела (АЧТ) на оптической оси с ИК ФМ и облучения фотоприёмника. Недостатком известного способа является то, что при детектировании наиболее шумящих цепочек анализируется влияние только тех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ, что имеют наибольшее среднеквадратическое отклонение (СКО) шума. При этом не анализируется влияние тех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ, что имеют относительно низкое СКО шума, негативное влияние таких цепочек на ОСШ может быть соизмеримо с негативным влиянием цепочек, имеющих наибольшее СКО шума. Это может происходить, когда канал ИК ФМ имеет цепочки, содержащие малозумящие ФЧЭ, чувствительность которых значительно меньше чувствительности наиболее шумящих ФЧЭ в других цепочках канала.

В связи с обнаруженным недостатком была сформулирована цель данной работы – модификация известного способа деселекции таким образом, чтобы учитывалось влияние не только наиболее шумящих элементных цепочек, а всех элементных цепочек каналов ИК ФМ с режимом ВЗН.

Задача, решённая разработанным способом, заключается в увеличении ОСШ каналов ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН, что повышает способность данного вида фотоприёмника обнаруживать маломощные оптические сигналы ИК диапазона. Решение задачи было обеспечено детектированием и деселекцией цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ. Далее цепочки, наиболее уменьшающие ОСШ каналов ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН, будут обозначаться как дефектные цепочки.

В результате, предложенный способ обеспечил большее повышение ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН по сравнению с существующим способом.

Способ определения дефектных цепочек

Разработанный способ деселекции предназначен для повышения ОСШ каналов

ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН за счёт отключения целого положительного числа малочувствительных или наиболее шумящих цепочек каналов.

Способ деселекции дефектных цепочек заключается в том, что необходимо установить АЧТ на одной оптической оси с модулятором и входным окном криостата, внутрь которого требуется предварительно поместить ИК ФМ. ИК ФМ, охлаждённый азотом до необходимой температуры нужно облучить посредством АЧТ, многократно измерить напряжения сигналов и шумов цепочек каналов ИК ФМ в режиме «*bypass*», рассчитать средние арифметические значения напряжений сигналов и дисперсии напряжений шумов цепочек каналов ИК ФМ, обработать результаты расчётов с использованием критерия детектирования дефектных цепочек. По результатам обработки детектировать и деселектировать дефектные цепочки каналов ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН.

Описание режима «*bypass*» приведено в [1–4]. Описание канала ИК ФМ и его элементных цепочек приведено в [1–4, 6, 7]. Многократные прямые измерения напряжений сигналов и шумов цепочек каналов ИК ФМ выполняются с помощью установки измерения основных параметров фотоприёмных устройств, описанной в [8, 9]. Многократные прямые измерения напряжений сигналов и шумов на указанной установке проводятся в соответствии с методикой, предложенной в [10].

Обработка результатов расчётов с помощью критерия детектирования дефектных цепочек представляет собой последовательность действий. В первую очередь, оценивается напряжение полезного сигнала i -й цепочки ($1 \leq i \leq N$) j -го канала ($1 \leq j \leq M$) по формуле (1):

$$S_{Pi,j} = S_{i,j} - \sigma_{i,j}, \quad (1)$$

где $S_{Pi,j}$ – оценка напряжения полезного сигнала i -й цепочки j -го канала, В; $S_{i,j}$ – среднее арифметическое значение напряжения сигнала i -й цепочки j -го канала, В; $\sigma_{i,j}$ – СКО напряжения шума i -й цепочки j -го канала, В; i – целый положительный номер цепочки j -го канала; j – целый положительный номер канала ИК ФМ.

Среднее арифметическое значение напряжения сигнала i -й цепочки j -го канала вычисляется по формуле (2):

$$S_{i,j} = \frac{1}{Q} \times \sum_{q=1}^Q S_{q,i,j}, \quad (2)$$

где $S_{q,i,j}$ – q -е измеренное значение напряжения сигнала i -й цепочки j -го канала, В; q – целый положительный номер измерения напряжения сигнала или шума i -й цепочки j -го канала ($1 \leq q \leq Q$); Q – целое положительное число измерений напряжения сигнала или шума i -й цепочки j -го канала, одинаковое для каждой цепочки каждого канала.

СКО напряжения шума i -й цепочки j -го канала вычисляется по формуле (3):

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{\text{Var}_{i,j}}, \quad (3)$$

где $\text{Var}_{i,j}$ – дисперсия напряжения шума i -й цепочки j -го канала, В².

Дисперсия напряжения шума i -й цепочки j -го канала вычисляется по формуле (4):

$$\text{Var}_{i,j} = \frac{1}{Q-1} \times \sum_{q=1}^Q (\sigma_{q,i,j} - \sigma_{\text{cp},i,j})^2, \quad (4)$$

где $\sigma_{q,i,j}$ – q -е измеренное значение напряжения шума i -й цепочки j -го канала, В; $\sigma_{\text{cp},i,j}$ – среднее арифметическое значение напряжения шума i -й цепочки j -го канала, В.

Среднее арифметическое значение напряжения шума i -й цепочки j -го канала вычисляется по формуле (5):

$$\sigma_{\text{cp},i,j} = \frac{1}{Q} \times \sum_{q=1}^Q \sigma_{q,i,j}. \quad (5)$$

Далее для j -го канала ИК ФМ оценивается полное ОСШ SNR_j , учитывающее влияние всех элементарных цепочек j -го канала – оно определяется как отношение оценки суммарного напряжения полезного сигнала j -го канала к оценке суммарного напряжения шума j -го канала. Полное ОСШ j -го канала оценивается по формуле (6):

$$SNR_j = \frac{S_{\Pi j}}{\sigma_j}, \quad (6)$$

где SNR_j – оценка полного ОСШ j -го канала, учитывающая влияние всех элементарных цепочек j -го канала; $S_{\Pi j}$ – оценка суммарного напряжения полезного сигнала j -го канала, В; σ_j – оценка суммарного напряжения шума j -го канала, В.

Суммарное напряжение полезного сигнала j -го канала оценивается по формуле (7):

$$S_{\Pi j} = \sum_{i=1}^N S_{\Pi i,j}. \quad (7)$$

Суммарное напряжение шума j -го канала оценивается по формуле (8):

$$\sigma_j = \sqrt{\text{Var}_j}, \quad (8)$$

где Var_j – это суммарная дисперсия напряжения шума j -го канала, В².

Суммарная дисперсия напряжения шума j -го канала оценивается по формуле (9):

$$\text{Var}_j = \sum_{i=1}^N \text{Var}_{i,j}. \quad (9)$$

После оценки полного ОСШ SNR_j j -го канала ИК ФМ оценивается ОСШ j -го канала без учёта влияния полезного сигнала и шума i -й цепочки j -го канала по формуле (10):

$$SNR_{i,j} = \frac{S_{\Pi j} - S_{\Pi i,j}}{\sqrt{\text{Var}_j - \text{Var}_{i,j}}}, \quad (10)$$

где $SNR_{i,j}$ – оценка ОСШ j -го канала без учёта влияния полезного сигнала и шума i -й цепочки j -го канала.

Далее определяется максимальное ОСШ j -го канала среди ОСШ $SNR_{i,j}$ j -го канала по формуле (11):

$$SNR_{\text{max},j} = \max_{1 \leq i \leq N} (SNR_{i,j}), \quad (11)$$

где $SNR_{\text{max},j}$ – максимальное ОСШ j -го канала среди ОСШ $SNR_{i,j}$ j -го канала.

Если $SNR_{\text{max},j} > SNR_j$, то находится такая i -я цепочка j -го канала, $SNR_{i,j}$ которой равно $SNR_{\text{max},j}$, и признаётся, что i -я цепочка j -го канала является цепочкой, наиболее снижающей ОСШ j -го канала ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН. Данную цепочку деселектируют.

Детектирование и деселекция цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ, обеспечило увеличение ОСШ каналов ИК ФМ, что повысило способность ИК ФМ произвольного формата с режимом ВЗН обнаруживать маломощные оптические сигналы ИК диапазона. Такой положительный эффект был достигнут за счёт того, что в j -м канале ИК ФМ анализировались все его цепочки с помощью нового критерия детектирования цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ. Анализ всех цепочек j -го канала позволил оценить влияние каждой цепочки на ОСШ j -го канала ИК ФМ. Таким же образом анализировались другие цепочки остальных каналов ИК ФМ. В результате анализа всех цепочек каждого канала ИК ФМ детектировались цепочки, наиболее уменьшающие ОСШ каналов фотоприёмника. Детектированные цепочки подлежали деселекции.

Обработка рассчитанных значений S_{ij} и Var_{ij} новым критерием обеспечило большее увеличение ОСШ каналов фотоприёмника по сравнению с обработкой критерием известного способа. Это произошло за счёт того, что предложенный критерий был представлен в виде правила, оценивающего влияние всех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН. Такое использование правила позволило детектировать цепочки, наиболее уменьшающие ОСШ каналов ИК ФМ.

Новый критерий по сравнению с известным является более общим правилом детектирования дефектных цепочек каналов ИК ФМ, поскольку новый критерий анализирует влияние всех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ, в том числе и наиболее шумящих цепочек.

Детектирование и деселекцию элементных цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН, осуществляют следующим образом.

В первую очередь, необходимо установить АЧТ на оптической оси с модулятором и входным окном криостата, внутрь которого требуется предварительно поместить ИК ФМ. Потом ИК ФМ нужно охладить азотом, после чего данный вид фотоприёмника облучить посредством АЧТ. Затем выполнить многократные прямые измерения напряжений сигналов и шумов цепочек каналов ИК ФМ за счёт пе-

реключения ИК ФМ из режима ВЗН в режим «bypass». По полученной измерительной информации рассчитать, используя формулы (2), (4) и (5), средние арифметические значения напряжений сигналов и дисперсии напряжений шумов цепочек каналов ИК ФМ. Для краткости, дисперсия напряжения шума будет обозначаться как дисперсия шума, а среднее арифметическое значение напряжения сигнала как средний сигнал.

Результаты расчётов для каждого j -го канала представляют собой выборку из N значений дисперсии шума $Var_{1,j}, \dots, Var_{i,j}, \dots, Var_{N,j}$, а также выборку из N значений средних сигналов $S_{1,j}, \dots, S_{i,j}, \dots, S_{N,j}$. Выборка из N значений средних сигналов преобразуют в выборку из N значений полезных сигналов $S_{П1,j}, \dots, S_{Пi,j}, \dots, S_{ПN,j}$. Полезный сигнал $S_{Пi,j}$ i -й цепочки j -го канала оценивают, пользуясь формулой (1).

По результатам оценок детектируют элементные цепочки, наиболее уменьшающие ОСШ каналов ИК ФМ. При детектировании данных цепочек используют новый, по отношению к известному способу, критерий детектирования дефектных цепочек. Критерий обнаруживает цепочки, наиболее уменьшающие ОСШ каналов ИК ФМ, посредством обработки средних сигналов и дисперсий шумов всех цепочек каждого канала. Обнаруженные цепочки подлежат деселекции.

В ИК ФМ с режимом ВЗН существует ограничение по числу отключаемых цепочек в канале. Число цепочек канала, после деселекции которых возможно компенсировать потери сигнала канала, обозначим как K , где $K \in Z^+$. K – максимальное число цепочек канала, отключение которых не приводит к невосполнимым потерям сигнала канала.

При проведении деселекции происходят потери сигнала в каналах, в которых отключили хотя бы одну дефектную цепочку. Чем больше отключенных цепочек в канале, тем больше потери. Потери необходимо восполнять. Потери восполняемы только тогда, когда отключается не более K цепочек [3] канала. Кроме того, отключение более K цепочек приведёт к ухудшению порога чувствительности ИК ФМ.

Параметр K определяется техническими возможностями конкретной модели ИК ФМ.

Условие $K \in Z^+$ определено сутью способа десе­лекции – повышение ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН за счёт отключения целого положительного числа цепочек в каналах. Без отключения цепочек ($K = 0$) повышения ОСШ не будет.

Модели фотомодулей с режимом ВЗН различаются по параметру K . Например, существуют фотомодули, способные компенсировать потери сигнала в канале от двух и менее десе­лектированных цепочек ($K = 2$), есть фотомодули, способные компенсировать потери сигнала в канале от трёх и менее десе­лектированных цепочек ($K = 3$). Поскольку невозможно компенсировать потери сигнала в канале при отключении всех цепочек канала – параметр K для всех моделей ИК ФМ с режимом ВЗН всегда будет удовлетворять условию $K \leq N - 1$.

Критерий детектирования цепочек, наиболее снижающих ОСШ каналов ИК ФМ произвольного формата с режимом ВЗН

Критерий позволяет сравнить полное ОСШ SNR_j j -го канала, учитывающее влияние всех цепочек данного канала, со следующими ОСШ: $SNR_{1,j}$, не учитывающее влияние полезного сигнала и шума первой цепочки j -го канала, ..., $SNR_{i,j}$, не учитывающее влияние полезного сигнала и шума i -й цепочки j -го канала, ..., $SNR_{N,j}$, не учитывающее влияние полезного сигнала и шума N -й цепочки j -го канала. Критерий представляет собой цикл, который последовательно проходит по N цепочкам j -го канала и повторяется для каналов ИК ФМ с другими номерами.

Формулировка критерия исходит из следующего. Имеется ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН, в каждом канале которого нельзя отключать более чем K цепочек, наиболее снижающих ОСШ канала. При этом задано k – начальное число цепочек, наиболее снижающих ОСШ j -го канала. Если среди ОСШ j -го канала $SNR_{1,j}, \dots, SNR_{N,j}$ есть такие, что больше полного ОСШ j -го канала SNR_j , то наиболее снижающей ОСШ j -го канала признаётся такая i -я цепочка j -го канала, ОСШ $SNR_{i,j}$ которой максимально больше SNR_j .

Критерий детектирования цепочек, наиболее снижающих ОСШ каналов ИК ФМ произвольного формата с режимом ВЗН, определяется следующей последовательностью действий:

1) задают $N \times M$ – формат ИК ФМ с режимом ВЗН, при этом должны выполняться условия: $N \in Z^+, N \geq 2$ и $M \in Z^+$;

2) задают K – допустимое число десе­лектируемых цепочек в каждом канале ИК ФМ, при этом должны выполняться условия: $K \in Z^+$ и $K \leq N - 1$;

3) задают $j = 1$, где j – номер канала;

4) задают $k = 0$, где k – начальное число цепочек, наиболее снижающих ОСШ j -го канала;

5) задают $i = 1$, где i – номер цепочки j -го канала;

6) оценивают полезные сигналы $S_{Pi,j}$ i -й цепочки j -го канала по формуле (1);

7) увеличивают i на единицу. Если $i \leq N$, то возвращаются к шагу 6. Если же $i > N$, то переходят к шагу 8;

8) оценивают суммарный полезный сигнал S_{Pj} j -го канала по формуле (7);

9) оценивают суммарный шум σ_j j -го канала по формуле (8);

10) оценивают полное ОСШ SNR_j j -го канала по формуле (6);

11) задают $i = 1$, где i – номер цепочки j -го канала;

12) рассчитывают ОСШ $SNR_{i,j}$ j -го канала, не учитывающее влияние полезного сигнала и шума i -й цепочки j -го канала ИК ФМ, по формуле (10);

13) увеличивают i на единицу. Если $i \leq N$, то возвращаются к шагу 12. Если же $i > N$, то переходят к шагу 14;

14) вычисляют максимальное ОСШ $SNR_{\max,j}$ j -го канала среди ОСШ $SNR_{i,j}$ j -го канала по формуле (11). Если $SNR_{\max,j} \leq SNR_j$, то считают, что в j -м канале имеются ровно k цепочек, наиболее снижающих ОСШ j -го канала. Переходят к шагу 15. Если же $SNR_{\max,j} > SNR_j$, то находят такую i -ю цепочку j -го канала, ОСШ $SNR_{i,j}$ которой равно ОСШ $SNR_{\max,j}$. Задают $S_{Pi,j} = 0$ В и $Var_{i,j} = 0$ В. Принимают, что i -ая цепочка является наиболее снижающей ОСШ j -го канала. Считают, что имеются как мини-

мум $k + 1$ цепочек, наиболее снижающих ОСШ j -го канала. Переходят к шагу 17;

15) увеличивают номер канала j на единицу;

16) если $j \leq M$, то возвращаются к четвёртому шагу. Если же $j > M$, то переходят к шагу 19;

17) увеличивают k на единицу;

18) если $k < K$, то возвращаются к пятому шагу. Если же $k \geq K$, то считают, что в j -м канале имеются как минимум K цепочек, наиболее снижающих ОСШ j -го канала. Возвращаются к шагу 15;

19) завершают детектирование цепочек, наиболее снижающих ОСШ каналов ИК ФМ произвольного формата с режимом ВЗН.

Обнаруженные критерием дефектные цепочки каналов ИК ФМ деселектируют.

Критерий детектирования цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ формата $N \times M$ с режимом ВЗН, позволил проанализировать влияние на ОСШ каналов не только наиболее шумящих, но и малошумящих и малочувствительных цепочек. Это помогло достигнуть большего увеличения ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН по сравнению с известным способом.

Результат применения разработанного способа

Результаты деселекции цепочек, наиболее снижающих ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН, разработанным способом иллюстрируются на рис. 2–5. На указанных рисунках также приведено сравнение результатов деселекции разработанным способом с результатами деселекции известным способом [1–5].

На рис. 2 продемонстрировано поканальное распределение ОСШ до деселекции цепочек каналов ИК ФМ с режимом ВЗН. На графике по горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения ОСШ до деселекции в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Непрерывной чёрной линией (отмеченной цифрой 1 на рис. 2) обозначено поканальное распределение ОСШ до деселекции, а пунктирной красной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 2) обозначено среднее арифметическое значение ОСШ до деселекции. Минимальное значение ОСШ равно 31,8 %, максимальное значение ОСШ равно 100 %, среднее арифметическое значение ОСШ равно 78 %.

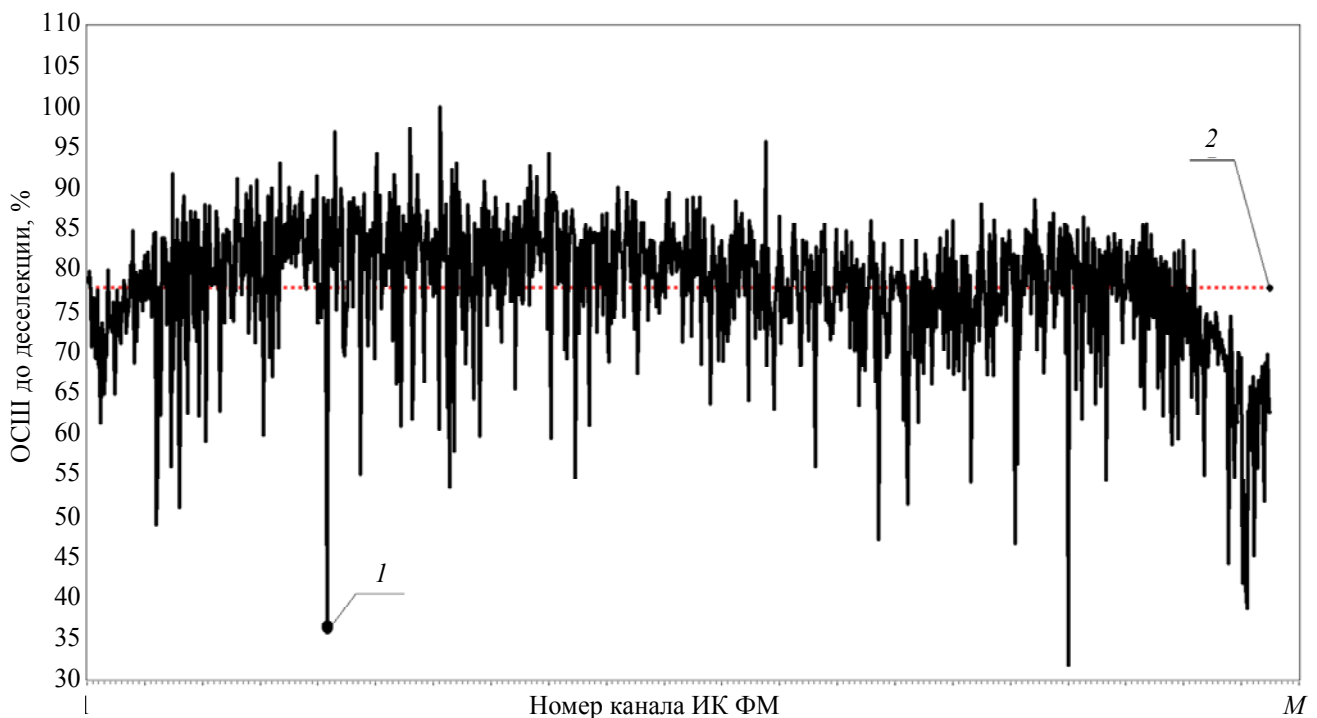


Рис. 2. Поканальное распределение ОСШ до деселекции

На рисунке 3а продемонстрировано поканальное распределение ОСШ после деселекции цепочек каналов ИК ФМ с режимом ВЗН известным способом. На графике по горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения ОСШ после деселекции известным способом в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Непрерывной чёрной линией (отмеченной цифрой 1 на рис. 3а) обозначено поканальное распределение ОСШ после деселекции известным способом, а пунктирной красной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 3а) обозначено среднее арифметическое значение ОСШ после деселекции. Минимальное значение ОСШ равно 32,3 %, максимальное значение ОСШ равно 107,5 %, среднее арифметическое значение ОСШ равно 83,6 %.

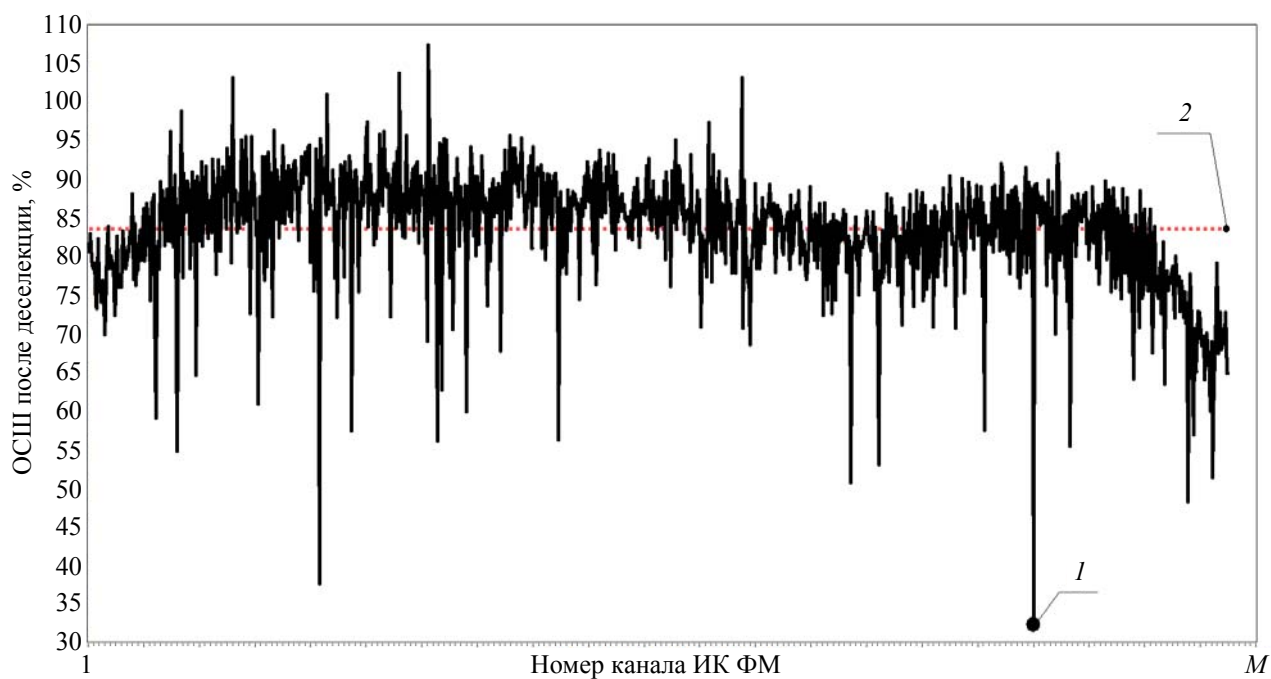
На рисунке 3б продемонстрировано поканальное распределение ОСШ после деселекции элементных цепочек каналов ИК ФМ с режимом ВЗН заявляемым способом. На графике по горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения ОСШ после деселекции заявляемым способом в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Непрерывной чёрной линией (отмеченной цифрой 1 на рис. 3б) обозначено поканальное распределение ОСШ после деселекции заявляемым способом, а пунктирной красной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 3б) обозначено среднее арифметическое значение ОСШ после деселекции. Минимальное значение ОСШ равно 32,9 %, максимальное значение ОСШ равно 107,6 %, среднее арифметическое значение ОСШ равно 84 %.

На рисунке 4а показано поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции известным способом и ОСШ до деселекции. На графике по горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения разницы между ОСШ после и до деселекции в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Непрерывной чёрной линией (отмеченной

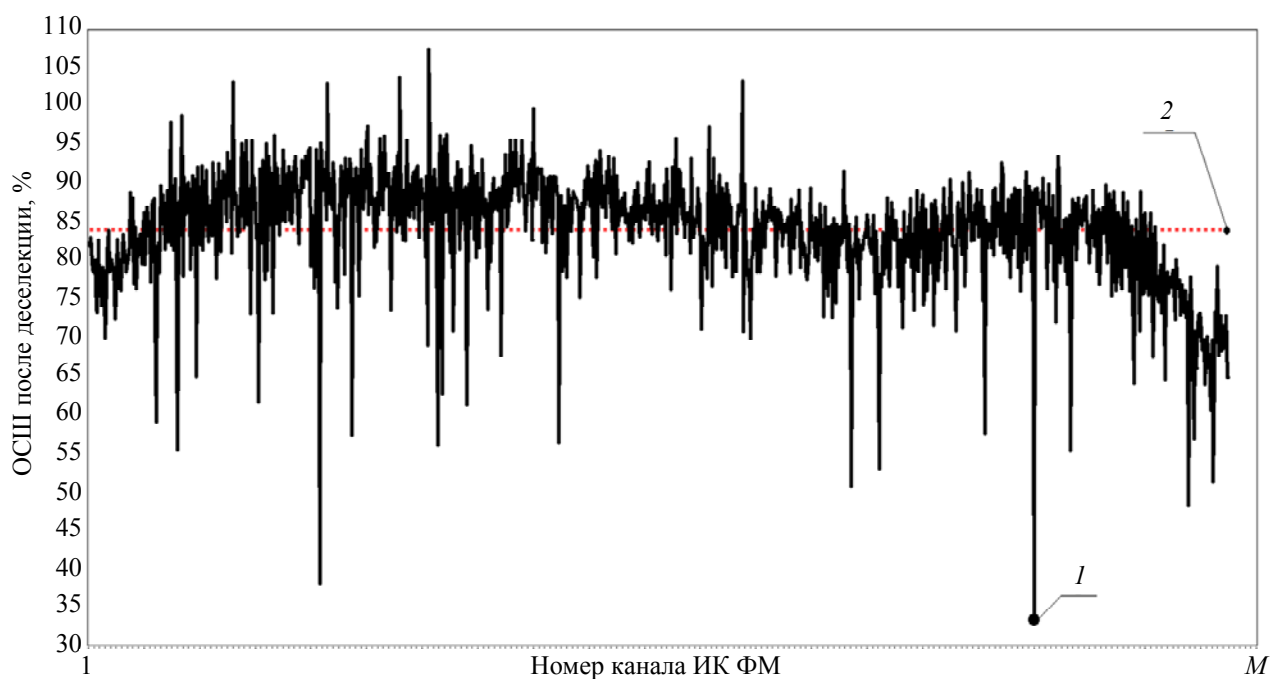
цифрой 1 на рис. 4а) обозначено поканальное распределение разницы между ОСШ после и до деселекции, а пунктирной красной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 4а) обозначено среднее арифметическое значение разницы между ОСШ после и до деселекции. Видно, что после деселекции известным способом существуют каналы ИК ФМ, ОСШ которых не изменилось. Есть каналы, ОСШ которых после деселекции значительно увеличилось, максимальное увеличение составило 30,2 %. В среднем, ОСШ каналов ИК ФМ после деселекции известным способом увеличилось на 5,7 %.

Отсутствие увеличения ОСШ в некоторых каналах ИК ФМ после деселекции известным способом позволяет утверждать, что наиболее шумящие цепочки не во всех случаях оказывают отрицательное влияние на ОСШ каналов. При этом следует отметить, что известный способ деселекции анализирует влияние только наиболее шумящих цепочек, при этом не анализирует влияние малошумящих цепочек, чувствительность которых может быть заметно меньше чувствительности наиболее шумящих цепочек.

На рисунке 4б показано поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ до деселекции. На графике по горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения разницы между ОСШ после и до деселекции в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Непрерывной чёрной линией (отмеченной цифрой 1 на рис. 4б) обозначено поканальное распределение разницы между ОСШ после и до деселекции, а пунктирной красной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 4б) обозначено среднее арифметическое значение разницы между ОСШ после и до деселекции. Видно, что после деселекции заявляемым способом ОСШ увеличилось во всех каналах ИК ФМ. Минимальное увеличение ОСШ составило 0,9 %, максимальное увеличение составило 30,2 %. В среднем, ОСШ каналов ИК ФМ после деселекции заявляемым способом увеличилось на 6 %.

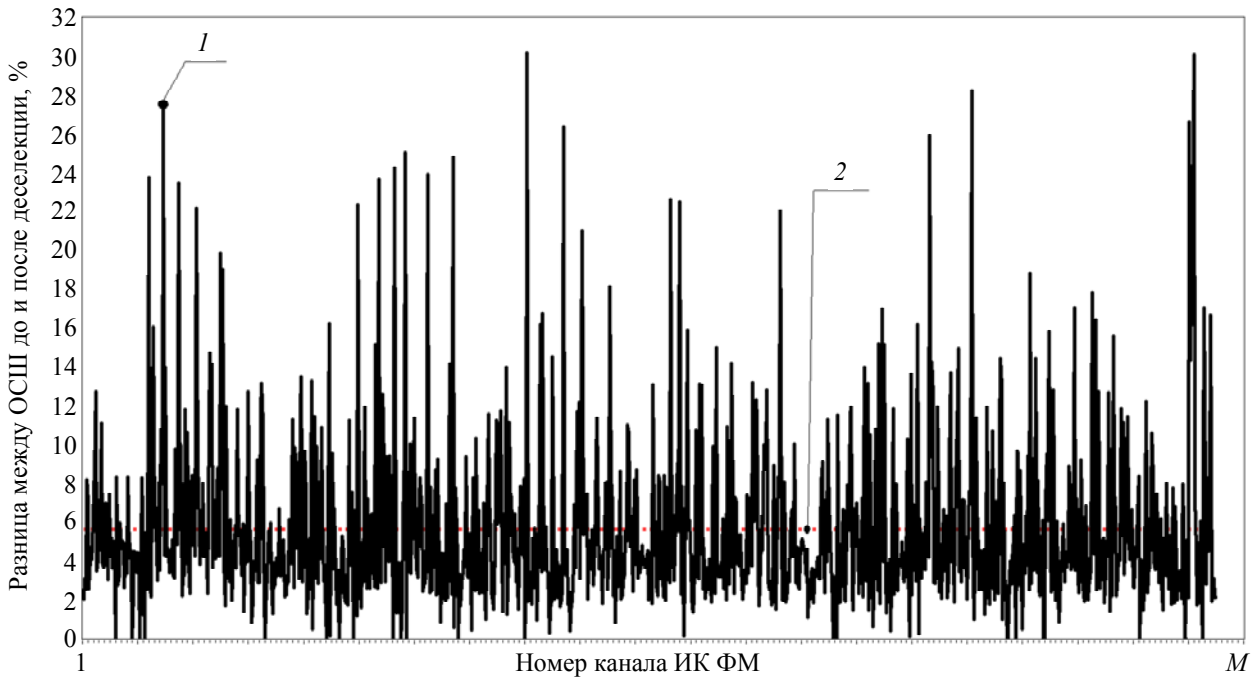


а)

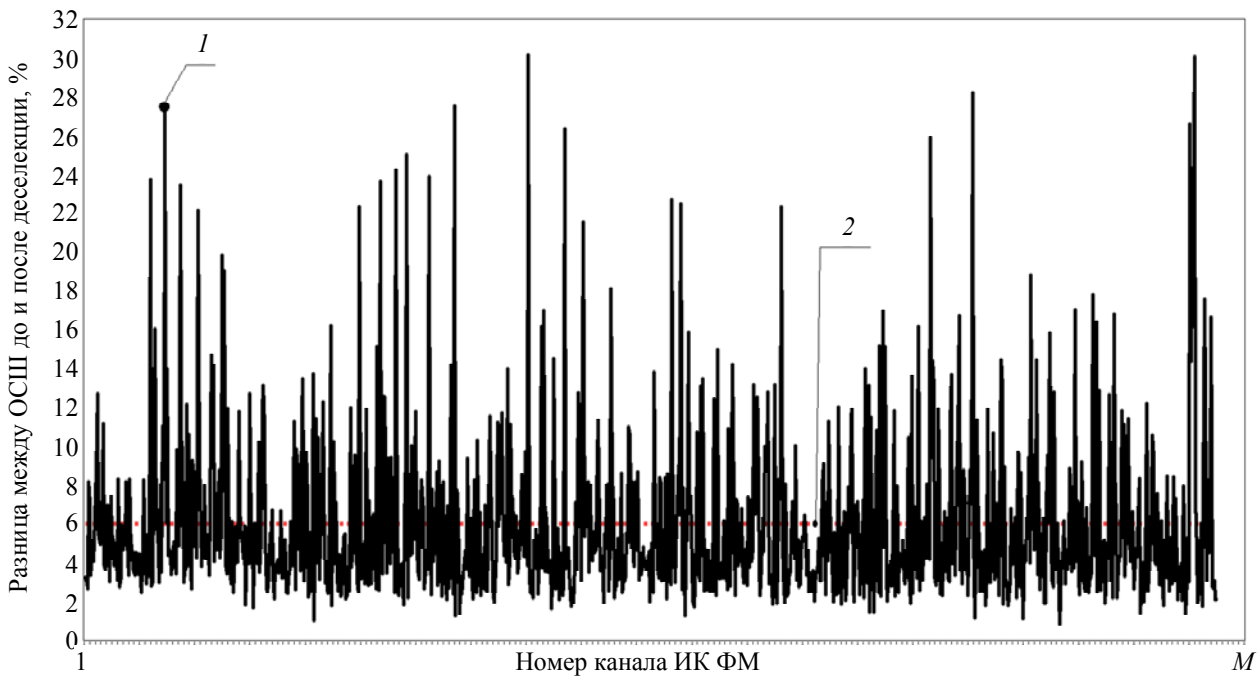


б)

Рис. 3. Поканальное распределение ОСШ после деселекции. а) – известный способ деселекции; б) – заявляемый способ деселекции



а)



б)

Рис. 4. Поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции и ОСШ до деселекции. а) – известный способ деселекции; б) – заявляемый способ деселекции

Увеличение ОСШ во всех каналах после деселекции дефектных цепочек означает, что в каждом канале была отключена как минимум одна цепочка, наиболее уменьшающая ОСШ. Из этого факта следует вывод, что элементные цепочки в каналах ИК ФМ неоднородны по уровню шума или чувствительности. Иными словами, в каждом канале ИК ФМ

нашлось не менее одной элементной цепочки, значительно отличающейся от других цепочек канала по уровню шума или чувствительности. Если бы в канале все элементные цепочки были однородны по уровню шума и чувствительности, то заявляемый и известный способы не обнаружили бы дефектных цепочек в силу их отсутствия.

Увеличение ОСШ в тех каналах, в которых известный способ не изменил ОСШ, позволяет сказать, что в некоторых каналах цепочками, наиболее уменьшающими ОСШ каналов, являются малозумящие, а не наиболее шумящие цепочки. Это может быть только в том случае, если малозумящие цепочки имеют чувствительность, меньшую по сравнению с чувствительностью наиболее шумящих цепочек.

Увеличение ОСШ в тех каналах, в которых применяемый способ не изменил ОСШ, было достигнуто за счёт того, что критерий детектирования дефектных цепочек, анализируют в каждом канале ИК ФМ влияние всех элементных цепочек на ОСШ канала.

На рисунке 5 показано поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции известным способом. На графике по горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения разницы между ОСШ после деселекции двумя способами в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Непрерывной чёрной линией (отмеченной цифрой 1

на рис. 5) обозначено поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции известным способом. Пунктирной красной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 5) обозначено среднее арифметическое значение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции известным способом.

Сравнение двух способов показало, что после деселекции в 53,6 % каналов заявляемый способ увеличивает ОСШ ровно на столько, насколько известный способ увеличивает ОСШ. В остальных 46,4 % каналов ИК ФМ заявляемый способ увеличивает ОСШ на большую величину по сравнению с известным способом. В таких каналах заявляемый способ максимально опережает известный на 9,5 %, а в среднем, заявляемый способ увеличивает ОСШ каналов ИК ФМ на 0,8 % лучше по сравнению с известным способом. Необходимо отметить, что указанное среднее арифметическое значение рассчитывалось по тем 46,4 % каналов ИК ФМ, в которых заявляемый способ увеличивает ОСШ лучше, чем известный способ.

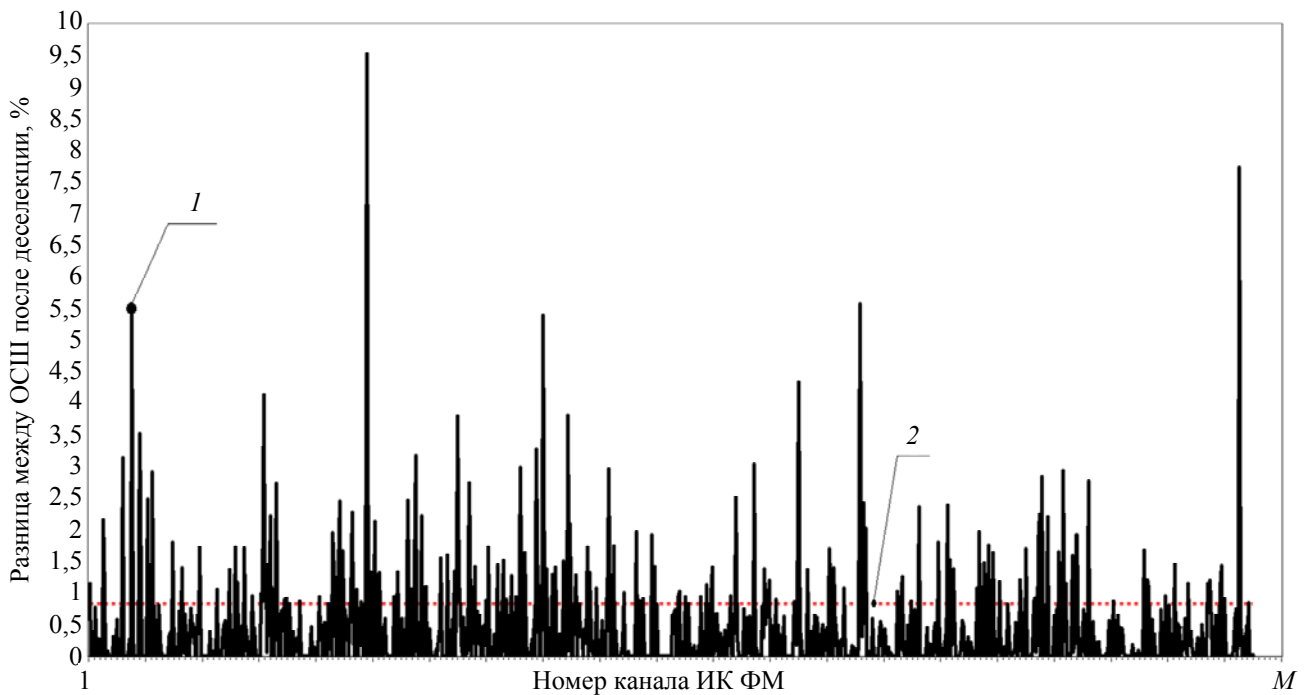


Рис. 5. Поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции известным способом

Обозначим через x величину увеличения ОСШ, измеряемую в процентах от максимального значения ОСШ до деселекции. Каналы ИК ФМ можно разделить на несколько групп, разделение выполняется по тому, насколько лучше заявляемый способ деселекции увеличивает ОСШ каналов в сравнении с известным способом:

а) 53,6 % каналов, в которых заявляемый способ не хуже известного. $x = 0$ %;

б) 29,4 % каналов, в которых заявляемый способ лучше известного. $0 \% < x \leq 0,8$ %;

в) 10,8 % каналов, в которых заявляемый способ лучше известного. $0,8 \% < x \leq 1,6$ %;

г) 3,4 % каналов, в которых заявляемый способ лучше известного. $1,6 \% < x \leq 2,4$ %;

д) 1,7 % каналов, в которых заявляемый способ лучше известного. $2,4 \% < x \leq 3,2$ %;

е) 1,1 % каналов, в которых заявляемый способ лучше известного. $3,2 \% < x \leq 9,5$ %.

Заявляемый способ деселекции (способ деселекции цепочек, наиболее снижающих ОСШ каналов ИК ФМ) в 13 % каналов оказался лучше известного (способ деселекции наиболее шумящих цепочек каналов ИК ФМ) не менее чем на 1 %. В остальных 87 % каналов заявляемый способ не хуже или лучше известного менее чем на 1 %. Из этого можно сделать вывод, что в большинстве каналов цепочками, наиболее снижающими ОСШ каналов ИК ФМ, являются наиболее шумящие цепочки. В таком случае задачу увеличения ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН за счёт деселекции цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов, можно одинаково эффективно решать заявляемым и известным способами.

Однако в некоторых каналах цепочками, наиболее снижающими ОСШ каналов ИК ФМ, являются цепочки с небольшим шумом и малой чувствительностью. В таком случае задачу увеличения ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН за счёт деселекции цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов, нельзя решить с помощью известного способа, так как он анализирует влияние только наиболее шумящих цепочек, что подчёркивает частность известного способа. Однако поставленную задачу можно решить посредством заявляемого способа.

Таким образом, применение заявляемого способа деселекции цепочек каналов ИК ФМ следует считать целесообразным, поскольку

он является более общим способом деселекции элементных цепочек, наиболее уменьшающих ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН. Это достигается благодаря тому, что заявляемый способ использует другой критерий детектирования дефектных цепочек. Новый критерий, по сравнению с известным, является общим правилом детектирования дефектных цепочек каналов ИК ФМ, поскольку новый критерий анализирует влияние всех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ, в том числе и наиболее шумящих цепочек.

Заключение

Итогом работы стала модификация известного способа [1–5] детектирования и деселекции наиболее шумящих цепочек, предназначенного для увеличения ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН. Модификация заключалась в изменении критерия детектирования наиболее шумящих цепочек, применяемого в известном способе. Изменения были направлены на то, что должно анализироваться влияние не только наиболее шумящих цепочек, а всех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ. Изменение критерия позволило детектировать цепочки, наиболее уменьшающие ОСШ каналов ИК ФМ. Модифицированный способ стал более эффективно увеличивать ОСШ каналов ИК ФМ

Дальнейшее развитие способа деселекции дефектных цепочек для увеличения ОСШ каналов ИК ФМ с режимом ВЗН связано с модификацией методики прямых многократных измерений напряжений сигнала и шума цепочек каналов ИК ФМ. На текущий момент можно предложить два направления модификации методики измерений:

- анализ влияния взрывного шума;
- анализ влияния шума ВЗН-регистра.

Каждое из указанных направлений модификации требует своих исследований. Первое направление требует исследования возможного наличия взрывного шума в цепочках каналов ИК ФМ. Второе направление требует исследования влияния шума ВЗН-регистра на общий уровень шума в каналах ИК ФМ. Результаты исследований позволят судить о перспективности указанных направлений модификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов О. В., Власова О. И. Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех 2022») / Сборник докладов конференции. – Москва, 2022. С. 428–434.
2. Бурлаков В. И., Гапонов О. В., Власова О. И. / Тезисы докладов XII науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство». – Москва, 2023. С. 10–12.
3. Гапонов О. В., Бурлаков В. И., Власова О. И. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 1. С. 42–51.
4. Гапонов О. В., Бурлаков В. И., Власова О. И. Способ деселекции последовательностей избыточно шумящих элементов в каналах инфракрасного фоточувствительного модуля с режимом временной задержки и накопления. Патент на изобретение № 2805779 (РФ). 2023.
5. Власова О. И., Гапонов О. В. Детектирование избыточно шумящих элементных цепочек в каналах инфракрасного фоточувствительного модуля с режимом временной задержки и накопления. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668842 (РФ). 2023.
6. Якимов Ю. А., Ларионов Н. А., Кузнецов А. Н. / Тезисы докладов X научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство». – Москва, 2021. С. 45–48.
7. Ларионов Н. А., Якимов Ю. А., Моцев И. С., Храпунов М. Л., Стрельцов В. А., Кузнецов П. А. / XXVI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, 2022. С. 216–218.
8. Козлов К. В., Бычковский Я. С., Кондюшин И. С., Матвеев А. В., Соляков В. Н., Пожидаев Д. А., Балиев Д. Л. / Прикладная физика. 2014. № 2. С. 64–68.
9. Козлов К. В., Бычковский Я. С., Кондюшин И. С., Матвеев А. В., Соляков В. Н., Пожидаев Д. А., Балиев Д. Л. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 170–176.
10. Бочков В. Д., Дразжников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. / Прикладная физика. 2014. № 1. С. 53–57.

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

A method for deselection of defective photosensitive elements which most decrease the signal-to-noise ratio in channels of an infrared focal-plane array with time delay integration mode

O. V. Gaponov¹, V. I. Burlakov¹ and V. V. Savtsov¹

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: gapn@yandex.ru

Received 05.12.2023; revised 29.12.2023; accepted 19.01.2024

A new method of deselection has been developed, relating to defect detection tool in infrared (IR) focal-plane array (FPA) with time delay integration (TDI) mode. The developed method is used to detect and deselect defective photosensitive elements (PSEs) that most decrease the signal-to-noise ratio (SNR) of the channels in the IR FPA. This method increases the SNR in the channels of the IR FPA, which increases the ability of the IR FPA to detect low-power optical signals in the infrared range. This result is ensured by the fact that the detection of defective PSEs is achieved by processing signals and noises of all PSEs using the criterion for detecting PSEs that most reduce the SNR in the channels of an IR FPA. This method is a common principle for detecting defective PSEs, because the criterion analyses the influence of all PSEs on the SNR in the channels of an IR FPA, including the overly noisy elements.

Keywords: photoelectronics, optoelectronic devices, infrared range, focal-plane array, time delay integration, noise, deselection, signal-to-noise ratio, photosensitive elements

REFERENCES

1. Gaponov O. V. and Vlasova O. I. Proc. Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy («Optotekh 2022»): Sbornik dokladov konferencii. Moscow, 2022, pp. 428–434 [in Russian].
2. Burlakov V. I., Gaponov O. V. and Vlasova O. I. Proc. XII scientific and practical conference of young scientists and specialists “Fotosensorika: novye materialy, tekhnologii, pribory, proizvodstvo”. Moscow, 2023, pp. 10–12 [in Russian].
3. Gaponov O. V., Burlakov V. I. and Vlasova O. I., J. Commun. Technol. Electron. **68**, 1046–1052 (2023).
4. Gaponov O. V., Burlakov V. I. and Vlasova O. I. Method for deselection sequences of excessively noisy elements in the channels of an infrared photosensitive module with a time delay and accumulation mode. Patent for invention № 2805779 (RF). 2023.
5. Vlasova O. I. and Gaponov O. V. Detection of overly noisy element circuits in the channels of an infrared focal plane array with time delay integration mode. Official registration of the Computer program № 2023668842 (RF). 2023.
6. Yakimov Yu. A., Larionov N. A. and Kuznetsov A. N. Proc. X scientific and practical conference of young scientists and specialists “Fotosensorika: novye materialy, tekhnologii, pribory, proizvodstvo”. Moscow, 2021, pp. 45–48 [in Russian].
7. Larionov N. A., Yakimov Yu. A., Moshchev I. S., Hrapunov M. L., Streltsov V. A. and Kuznetsov P. A. Proc. XXVI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya. Moscow, 2022, pp. 216–218 [in Russian].
8. Kozlov K. V., Bychkovsky J. S., Kondushin I. S., Matveev A. V., Solyakov V. N., Pozhidaev D. A. and Bалиев D. L., Applied Physics, № 2, 64–68 (2014) [in Russian].
9. Kozlov K. V., Bychkovsky J. S., Kondushin I. S., Matveev A. V., Solyakov V. N., Pozhidaev D. A. and Bалиев D. L., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **2** (2), 170–176 (2014) [in Russian].
10. Bochkov V. D., Drazhnikov B. N., Kyznetsov P. A., Kozlov K. V. and Solyakov V. N., Applied Physics, № 1, 53–57 (2014) [in Russian].