

Научная статья

УДК 620.192.63

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-142-152

ПРИРОДА ШУМОВ В ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ, ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ В ЦИФРОВОМ РАДИОГРАФИЧЕСКОМ ИЗОБРАЖЕНИИ (обзор)

Е.И. Косарина¹, Н.А. Михайлова¹, П.В. Суворов¹, А.А. Демидов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы природы шумов при формировании цифровых радиографических изображений. Проведена классификация видов шума и определено, какие из его видов возможно убрать из цифрового изображения. Изучены способы моделирования шумов и оценки их уровня, а также подавления; отмечены достоинства и недостатки каждого из рассмотренных способов. Показано, какие шумы возникают на этапах формирования радиационных изображений и преобразования их в цифровые. Отмечено, что шум квантования не может быть устранен последующей фильтрацией, так как является неотъемлемой характеристикой цифровой детекторной системы.

Ключевые слова: цифровая радиография, цифровое изображение, пиксель, шум квантования, флуктуационный шум, пространственный спектр изображения

Для цитирования: Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Суворов П.В., Демидов А.А. Природа шумов в цифровой радиографии, их моделирование и способы подавления в цифровом радиографическом изображении (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-142-152.

Scientific article

THE NATURE OF NOISE IN DIGITAL RADIOGRAPHY, THEIR MODELING AND WAYS OF SUPPRESSION IN THE DIGITAL RADIOGRAPHIC IMAGE (review)

E.I. Kosarina¹, N.A. Mikhaylova¹, P.V. Suvorov¹, A.A. Demidov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Questions of the nature of noise are considered when forming digital radiographic images. Classification of types of noise is carried out and are defined, what of its types it is possible to clean from the digital image. Ways of modeling of noise and assessment of their level, and also suppression are studied; merits and demerits of each of the considered ways are noted. It is shown, what noise arise at stages of forming of radiation images and their transformations to the digital. It is noted that the quantization noise cannot be eliminated with the subsequent filtering as is the integral characteristic of digital detector system.

Keywords: digital radiography, digital image, pixel, quantization noise, fluktuatsionny noise, space range of the image

For citation: Kosarina E.I., Mikhaylova N.A., Suvorov P.V., Demidov A.A. The nature of noise in digital radiography, their modeling and ways of suppression in the digital radiographic image (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-142-152.

Введение

В настоящее время информационные технологии получили новое развитие – цифровизацию, которая затрагивает все стороны жизнедеятельности человека, в том числе при создании новых материалов и исследовании их качества методами неразрушающего контроля [1, 2]. Среди всех видов и методов неразрушающего контроля радиационные методы по их распространению в производстве изделий и частично при их эксплуатации занимают одно из первых мест [3]. В радиационном неразрушающем контроле одним из аспектов цифровизации является применение цифровых детекторных систем, используемых как непосредственно в качестве преобразователей радиационных изображений, так и блоков, входящих в состав систем рентгеновской компьютерной томографии [4]. Основная проблема широкого распространения систем цифровой радиографии состоит в достижении качества получаемого изображения. Оно должно быть не хуже качества, получаемого на радиографическом снимке при соблюдении требуемого регламента. Проведены исследования по замене пленочной радиографии на цифровую радиографию с использованием цифровой детекторной системы. Результат исследования замены радиографической пленки показал, что наиболее адекватным решением является применение цифровых детекторных систем.

Действительно преимущества цифровой радиографии очевидны, тем более что их технический прогресс не стоит на месте. В настоящее время широко используются детекторные системы с разрешением 100–200 мкм при толщине исследуемых объектов 20–40 см. Усовершенствуются также и скинтлляторы: изменение состава направлено на повышение их радиационной устойчивости и чувствительности к излучению. Отчетливо видна тенденция к увеличению разрешающей способности детекторов – уже существуют детекторы с размером пикселя 75 и даже 50 мкм. Качество детекторов постоянно растет. Однако их успешное внедрение в неразрушающий контроль на производстве заключается не только в том, чтобы использовать более совершенные детекторные системы, но и в том, чтобы их адаптация к тем или иным объектам контроля проходила не эмпирически (путем проб и ошибок), а априори. Для этого необходимы методы и средства, применение которых объективно и просто дает оценку качества изображений. В отличие от традиционной радиографии качество цифрового изображения определяется не столько контрастом, сколько величиной отношения сигнал/шум.

Природа шумов при контроле изделий методом цифровой радиографии

Уровень шума цифрового изображения объектов контроля значительно превышает уровень шумов изображения, выполненного на радиографическом снимке. Поэтому, чтобы увеличить отношение сигнал/шум и хотя бы незначительно приблизить его к аналогичному параметру для радиографического снимка, необходимо провести анализ природы шумов при формировании цифрового изображения. Шум – это случайный процесс, не несущий полезной информации, который невозможно выразить аналитически [5]. На каждом этапе формирования и преобразования любого изображения воздействие шумов неизбежно (рис. 1).

Если на цифровом изображении (рис. 2, *а*) вдоль произвольно выбранной линии *AB* измерять уровень серого G_i в каждом из пикселей (p_1-p_6), то получим картину, представленную на рис. 2, *б*. Каждый *i*-й пиксель представляет собой прямоугольный импульс, амплитуда которого равна G_i , а длительность импульса равна размеру пикселя. Уровень серого в каждом из рассматриваемых пикселей представляет собой результат воздействия, вызванный сигналом и шумом. Составляющая уровня серого, связанная с шумом для данного пикселя, не зависит от шума в пикселях из его окрестности.

Это обстоятельство соответствует определению «белого» шума. Пространственная частота для всех пикселей одинакова, она же является максимальной пространственной частотой цифровой детекторной системы. Все мелкие элементы изображения, размеры которых меньше утроенного размера пикселя, не могут быть воспроизведены данной детекторной системой.

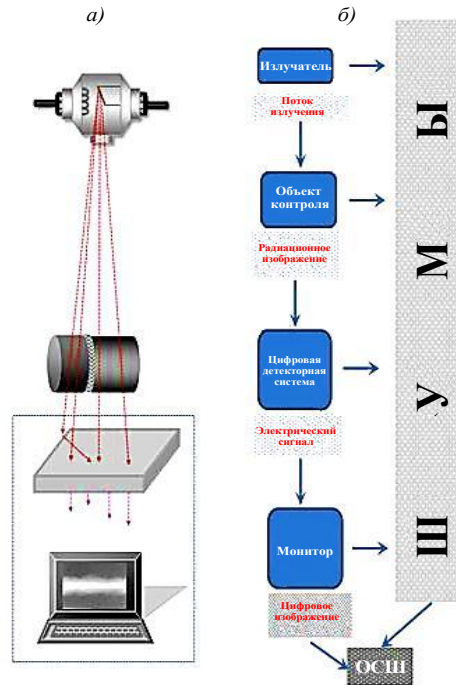


Рис. 1. Схемы контроля (а) и формирования и преобразования радиационного изображения в цифровое (б); ОСШ – отношение сигнал/шум

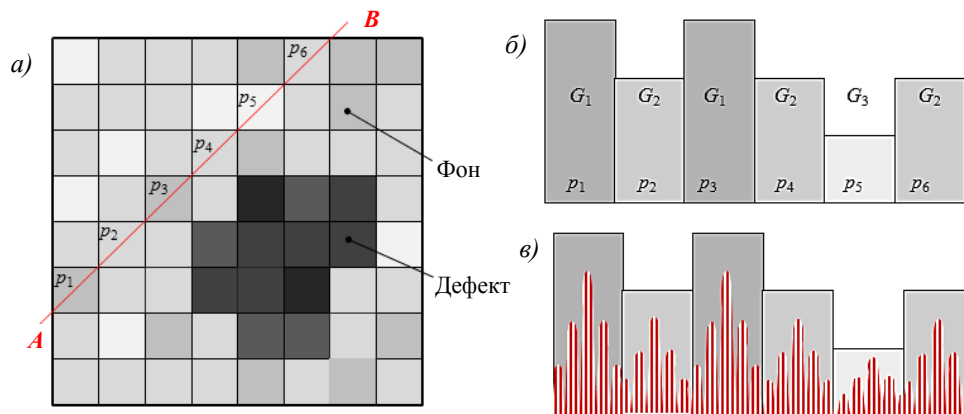


Рис. 2. Условное цифровое изображение на экране монитора цифрового детектора: а – изображение объекта с дефектом; б – пиксели p_{1-6} вдоль линии AB с присущими им уровнями серого; в – пространственный спектр пикселей p_{1-6}

Природа шумов цифрового изображения различна.

Во-первых, сигнал, поступающий на вход детектора (радиационное изображение), помимо полезного сигнала содержит шум. Шум радиационного изображения вызван случайным характером зарождения фотонов в источнике излучения, комптоновским рассеянием, колебаниями толщины и плотности объекта контроля, которые не являются дефектом.

Во-вторых, сам детектор является сложной электронной системой, производящей шумы, различные по своей природе. Электроника детекторной системы производит флуктуационные шумы, которые складываются:

- из шума, порожденного флуктуациями объемной плотности электрического заряда в элементах электрических схем преобразователей;
- из хаотического теплового движения заряда и наличия темновых токов.

В-третьих, причины искаженного изображения возникают в связи с дискретизацией и количеством уровней серого – это шумы квантования. Величина шума квантования представляет собой разность между исходным изображением и его дискретизированной и квантованной копией (рис. 3) [6].

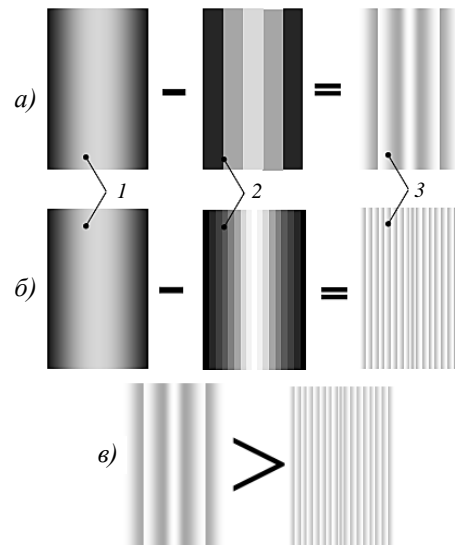


Рис. 3. Природа возникновения шумов квантования при разных уровнях дискретизации (а, б): 1 – исходное изображение; 2 – дискретизированные копии изображения; 3 – шумы квантования при разных уровнях дискретизации; в – сравнение шумов квантования при разных уровнях дискретизации

Шум квантования коррелирован с входным сигналом, поэтому он не может устраняться при последующей фильтрации – он тем меньше, чем больше уровней квантования и чем меньше размер пикселя. Каждому детектору присущ свой шум квантования, поэтому, чтобы его уменьшить, необходимо выбрать другую детекторную систему с матрицей, имеющей большее число уровней квантования с меньшим размером пикселей. Шумы квантования определяются размером пикселя p [мм]. Пространственный спектр шумов квантования принято называть высокочастотным при размере пикселя $p = 100$ мкм и пространственной частоте $1/p = 10^4$ мм⁻¹.

Контрастные свойства шумов квантования невысоки, однако их присутствие ухудшает воспроизведение мелких и малоконтрастных дефектов.

Как правило, выделяют две группы моделей шума: пространственные и частотные. Пространственные модели описывают статистическое распределение шума в яркостном пространстве [7]. Модель может быть описана одноименным законом распределения плотности вероятности значений в уровнях серого. Частотные модели описывают распределение спектральной плотности мощности шума, которое может быть получено при помощи быстрого преобразования Фурье.

К ним обычно относят белый шум, имеющий одинаковое значение спектральной плотности мощности во всем частотном диапазоне.

В цифровых детекторных системах (ЦДС) на экране монитора виден суммарный шум входного сигнала, флуктуационный и шум квантования.

Шум входного сигнала

При напряжении на аноде рентгеновской трубки, равном U , создается электростатическое поле, в котором электроны приобретают потенциальную энергию, равную $\bar{e} \cdot U$, где \bar{e} – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Под действием электростатического поля электрон притягивается к положительному потенциалу анода. Потенциальная энергия электронов, находящихся в вакуумном пространстве рентгеновской трубки, превращается в кинетическую [8, 9]. При их резком торможении на вольфрамовой мишени анода кинетическая энергия электронов трансформируется двумя способами:

– при прохождении электрона в электронном слое материала мишени происходит потеря кинетической энергии электрона за счет ионизации атомов и повышения температуры мишени – так называемые ионизационные и тепловые потери;

– если электрон достигает ядра, то при столкновении с ним образуется фотон тормозного излучения, и поскольку к ядру электрон может подойти с любой кинетической энергией, утратив часть ее при прохождении электронного слоя, то энергия тормозного фотона может быть любой, но не более потенциальной энергии электрона в электростатическом поле рентгеновской трубки $\bar{e}U$.

В этом заключается стохастичность процесса зарождения фотонов, составляющих тормозное рентгеновское излучение. На выходе из рентгеновского излучателя поток фотонов тормозного излучения является случайной величиной, имеющей определенные статистические характеристики. Для их описания возможно применение такой вероятностно-статистической модели, которая бы репрезентативно описывала процесс генерации фотонов. Согласно работе [10], была доказана репрезентативность принятого распределения Пуассона. Вероятность зарождения фотона с энергией $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \cdot \bar{e} \cdot U$

определяется соотношением $P_m = \frac{(p \cdot \varepsilon_{\text{ср}})^m}{m!} \cdot e^{-\varepsilon_{\text{ср}}}$, где $m = 1, 2, 3, \dots, n$; $0 \leq \bar{e} \cdot U$;

e – основание натурального логарифма (неперово число); p – вероятность того, что электрон столкнется с ядром и произойдет зарождение фотона. Общее количество электронов в рентгеновской трубке N_3 с анодным током I определится из соотношения

$I = \frac{Q}{t} = \frac{N_3 \cdot \bar{e}}{t}$ [мА = Кл/с], где Q – суммарный заряд всех электронов, составляющих

ток рентгеновской трубки, Кл; тогда $N_3 = \frac{I \cdot t}{\bar{e}}$. На основании статистических данных,

представленных в работе [11], на каждые сто электронов приходится один фотон $N_{\text{ф}} = 0,01N_3$, следовательно, вероятность того, что хотя бы один электрон породит один фотон, составляет $p = 0,01$.

Для распределения Пуассона характерно, что его математическое ожидание и дисперсия равны $\varepsilon_{\text{ср}}$. При работе рентгеновской трубки статистически известно, что большинство фотонов имеют энергию, равную $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \cdot \bar{e}U$. При анодном напряжении 100 кВ и токе 10 мкА образуется

$$N_{\text{ф}} = \frac{0,01 \cdot I \cdot t}{\bar{e}} = \frac{0,01 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{11} \text{ фотонов.}$$

На рис. 4 представлено распределение числа фотонов, выходящих из окна рентгеновской трубки, по энергии. Это, по сути, пуассоновская модель:

$$P_{N_{\phi}} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}}^{N_{\phi}}}{N_{\phi}!} \cdot e^{-\varepsilon_{\text{ср}}}.$$

Вычисление таких больших чисел сопряжено с трудностями, поэтому используем неравенство Чебышева: $\{P[N_{\phi} - M(N_{\phi,\text{ср}})] \geq \delta\} \leq \frac{\sigma^2}{\delta^2}$ при $\delta = 2\sigma$ – вероятность $P \leq 0,5$; при $\delta = \sigma$ – $0,5 \leq P \leq 1$, где $M(N_{\phi,\text{ср}})$ – среднее число фотонов; δ, σ – соответственно произвольное и стандартное отклонение от среднего значения $M(N_{\phi,\text{ср}})$.

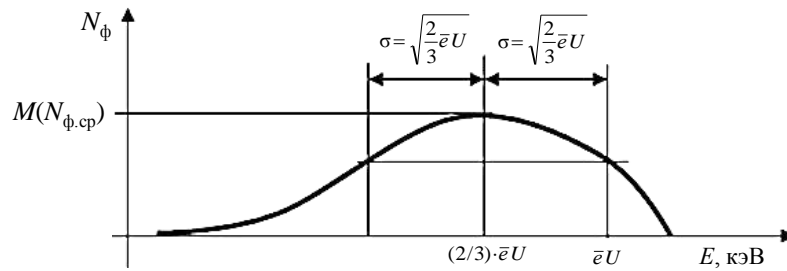


Рис. 4. Распределение числа фотонов по энергии на выходе из рентгеновской трубки

Поток фотонов в количестве N_{ϕ} , направленный на объект контроля, взаимодействует с ним, и создается теневое радиационное изображение, содержащее как полезную информацию (сигнал), так и шум. Принято считать [12], если число фотонов, создающих сигнал, $N_{\text{из}}$, то число фотонов, создающих шум, $N_{\text{ш}} = \sqrt{N_{\text{из}}}$.

Каждый фотон, генерируемый рентгеновской трубкой, обладает некоторой энергией $\varepsilon_i = h\nu_i$, где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – энергетическая постоянная Планка; ν – частота колебаний, с^{-1} . Доза D и мощность дозы излучения J определяются соответственно соотношениями: $D = h\nu_{N_1} + h\nu_{N_2} + \dots + h\nu_{N_i} + \dots + h\nu_{N_{\phi}} = \sum_{N_i=N_1}^{N_{\phi}} h\nu_{N_i}$ и $J = \frac{D}{t}$, где t – продолжительность излучения, с.

Для сигнала и шума выражения через дозу и мощность дозы соответственно: $D_{\text{из}}, J_{\text{из}}$ – доза и мощность дозы излучения, формирующие радиационное изображение объекта контроля; $D_{\text{ш}} = \sqrt{D_{\text{из}}}, J_{\text{ш}} = \sqrt{J_{\text{из}}}$ – доза и мощность дозы излучения, формирующие радиационное изображение шума.

Для объекта контроля толщиной d [см], выполненного из материала с линейным коэффициентом ослабления излучения μ [см^{-1}], радиационное изображение объекта: $J_{\text{из}} = J e^{-\mu d}$.

Если на объект контроля падают фотоны, энергия которых подчиняется пуассоновскому распределению, то очевидно, что любая часть этих фотонов распределена по закону Пуассона, в том числе и та их часть, которая участвовала в формировании радиационного изображения из объекта контроля. Распределение энергии фотонов, составляющих шум, также подчиняется пуассоновскому распределению, но с измененными математическими ожиданиями и дисперсиями. Величина радиационного изображения шума, создаваемого стохастичностью фотонов и их энергий: $J_{\text{ш}} = \sqrt{J_{\text{из}}} = \sqrt{J e^{-\mu d}}$. Этот шум, состоящий из фотонов, поступает на вход детектора и, суммируясь с собственным

шумом детектора при отсутствии сигнала, создает шумовую картину на его выходе. Эти шумы неотделимы друг от друга, поэтому дадим им количественную оценку. Шум радиационного изображения состоит из отдельных фотонов – стохастических и независимых друг от друга фотонов. Оценим уровень радиационного изображения. Для рентгеновского аппарата мощность дозы излучения при анодном напряжении U и токе I определяется соотношением $J = k_{\text{апп}} \cdot U_a^n \cdot I$, где U_a – напряжение на аноде рентгеновской трубки; I – анодный ток трубки; $k_{\text{апп}}$ – аппаратный коэффициент, зависящий от схемы питания рентгеновской трубки. Мощность экспозиционной дозы J , выделяемой рентгеновским аппаратом, можно определить по обобщенной формуле $J = \frac{P_T \cdot I}{F^2}$, где P_T – лучевая отдача трубки, $\text{P} \cdot \text{см}^2 / (\text{мА} \cdot \text{с})$; I – ток трубки, мА; F – расстояние от анода трубки до монитора, м (рис. 5).

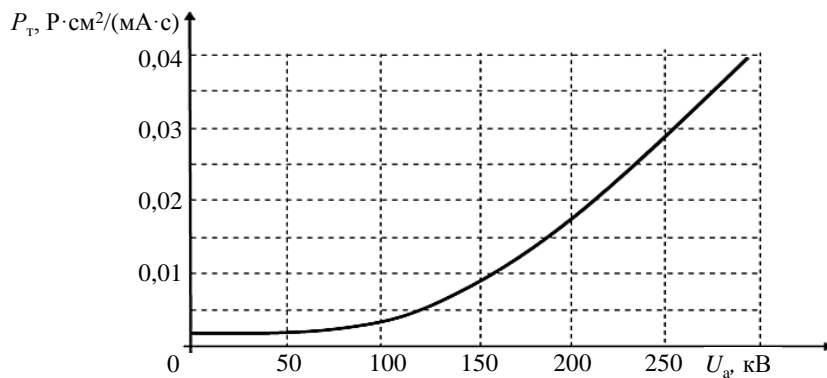


Рис. 5. Лучевая отдача рентгеновской трубки

Мощность дозы шума определим из соотношения $J_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{P_T \cdot I}{F^2}} \cdot e^{-\mu d}$. Это величина стохастическая, в общем случае с неизвестным распределением. Посредством цифрового детектора происходит преобразование радиационного изображения (сигнала и шума) в цифровое изображение, на котором цифровой шум заметен в виде наложенной маски из пикселей случайной яркости, поэтому реконструированное изображение, по сравнению с исходным, имеет искаженный характер.

Для проведения оценки шума его моделируют тем или иным адекватным образом. Проведем анализ некоторых наиболее распространенных оценок шума цифровой изобразительной информации.

При проведении оценки шумов в цифровых изображениях их моделируют двумя группами: пространственными и частотными.

Обзор способов моделирования шумов Пространственные модели

Описание пространственной модели осуществляют посредством выбора наиболее репрезентативных статистических распределений шума – например, Гауссово и экспоненциальное распределение или др.

В работе [13] рассмотрены эталонные и неэталонные оценки качества изображений. Для осуществления *эталонного* способа оценки необходимо иметь эталонное изображение, представляющее собой, допустим, цифровую рентгенограмму объекта контроля, которая подверглась обработке тем или иным способом. Далее для оценки

шума цифрового изображения реальной рентгенограммы ее представляют как некую аддитивную модель, т. е. результирующий сигнал B выражают формулой $B = A + N$, где A – полезная составляющая сигнала, описывающего изображение; N – шумовая составляющая сигнала.

Количественную оценку шума определяют по статистическим показателям. В качестве абсолютной оценки применяется среднеквадратичное отклонение реального сигнала, описывающего изображение, от полезного, т. е. среднеквадратичное значение шума [14].

Неэталонная оценка качества цифрового изображения осуществляется в основном по трем вариантам. Первые два основаны на оценке отклонений от медианы и анализе результатов вейвлет-преобразования, а третий – это так называемый блочный вариант.

В первом случае вычисляют массив пикселей (MAD), составляющих изображение, затем – массив MAD, содержащий отклонения от медианы для каждого пикселя всего изображения: $MAD(i, j) = I(i, j) - \text{median}[I(i, j)]$, где $I(i, j)$ – отсчет, описывающий пиксель с координатами i и j ; $\text{median}[I(i, j)]$ – медиана пикселя $I(i, j)$.

Затем вычисляют медиану для всего массива MAD и умножают на полученный опытным путем коэффициент: $\bar{N} = 1,483 \cdot \text{median}(MAD)$. Результатом расчета является среднеквадратичное значение шума. Достоинство данного метода – простота в реализации. Среди его недостатков можно выделить потребность в дополнительной памяти ЦДС для хранения массива MAD, а также неоднозначность при выборе рабочего окна для вычисления медианы для каждого пикселя на первом этапе.

На основе анализа результатов *вейвлет-преобразования* изображения существует множество методов оценки уровня шума. Их основная идея заключается в статистическом анализе распределения коэффициентов вейвлет-преобразования в зависимости от типов вейвлета.

Основные недостатки этого метода – это потребность в большом объеме дополнительной памяти ЦДС для хранения вейвлет-коэффициентов и гистограмм их распределения, а также достаточно сложные математические вычисления.

Классический алгоритм *блочного* метода заключается в разбиении изображения на отдельные части и поиске частей изображения с наименьшим среднеквадратичным отклонением от среднего значения [15]. Среднее значение среднеквадратичного отклонения для N блоков рассчитывают по формуле

$$\bar{N} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N \sigma_k^2},$$

где N – априорно выбранное количество блоков с минимальной дисперсией отсчетов; σ_k^2 – дисперсия для k -го блока с наименьшей дисперсией сигналов; \bar{N} – среднеквадратичное значение шума (величина \bar{N} представляет собой оценку уровня шума).

Достоинство данного метода – простота и малое количество памяти ЦДС, требуемой в ходе анализа. В качестве недостатка требуется указать неэффективность данного метода на изображениях, не имеющих больших гладких областей, и неоднозначность подходов к выбору размера и количества анализируемых блоков.

Частотные модели

С помощью частотной модели можно описать распределение уровня серого от пространственной частоты, которое получают дискретным преобразованием Фурье исследуемого цифрового изображения [16]. Модели шума можно представить следующими видами (рис. 6):

- белый шум, имеющий одинаковое значение уровня серого во всем диапазоне пространственных частот;
- красный шум, имеющий снижающийся уровень серого с ростом пространственной частоты;
- синий шум, имеющий возрастающий уровень серого с ростом пространственной частоты;
- серый шум, имеющий высокий уровень серого в областях высоких и низких пространственных частот.

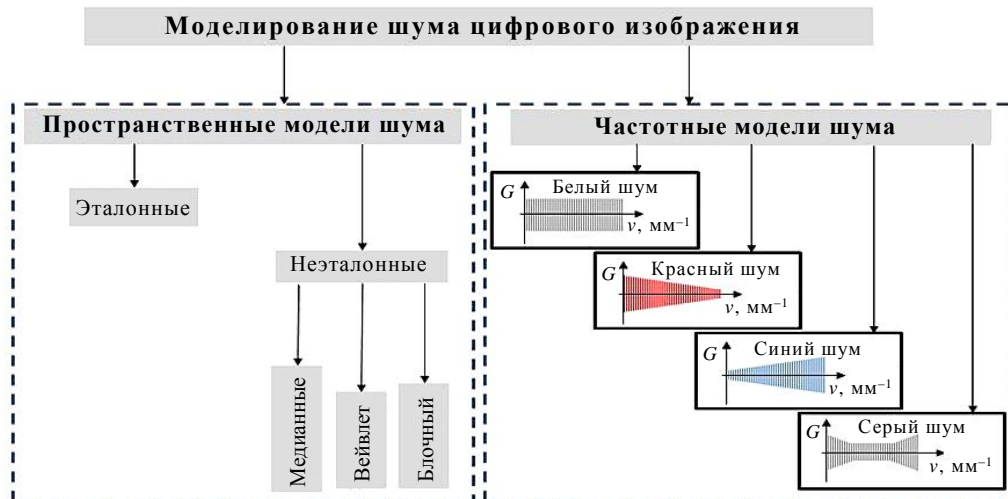


Рис. 6. Варианты моделирования для оценки шумов в цифровом изображении (G – уровень серого)

В работе [17] приведено описание эксперимента оценки шумов частотным методом. В качестве шумового воздействия на изображение автор обосновано выбрал модель белого шума. При изучении пространственного спектра цифрового изображения отмечено, что для реального цифрового изображения характерно наличие некоторых частотных составляющих с высоким значением уровня серого. Для белого шума эти составляющие соответствуют высоким пространственным частотам. Поскольку преобразование Фурье является линейным оператором, все высокие пространственные частоты спектра можно считать, относящимися к шуму.

Недостатками этого метода оценки шумов являются потребность в большом объеме памяти ЦДС и сложность вычислений преобразования Фурье.

Результаты работы получены с использованием ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Заключения

Проведен анализ:

- природы шумов при формировании цифрового радиографического изображения;
- оценки шума при моделировании его разными способами.

Установлено, что все способы моделирования имеют недостатки, не позволяющие выделить преимущество любого из них. Основными недостатками практически всех изученных способов оценки шума являются сложность их реализации, неоднозначность результатов и требования большого объема памяти ЦДС.

В связи с вышеизложенным требуется провести исследования и разработать простые физические средства, позволяющие имитировать шум в широком диапазоне пространственных частот. Такие разработки будут способствовать более широкому внедрению цифровой радиографии в промышленность.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
3. Славин А.В., Далин М.А., Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Современные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля в авиационной отрасли (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 12 (106). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106.
4. Обухова Н.А., Мотако А.А., Поздеев А.А. Исследование и разработка методов улучшения эндоскопических (медицинских) изображений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 2. С. 22–29.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2019. 1104 с.
6. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 583 с.
7. Косарина Е.И., Демидов А.А., Михайлова Н.А., Смирнов А.В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную информацию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.
8. Лапшенков Е.М. Неэталонная оценка уровня шума цифрового изображения на основе гармонического анализа // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36. № 3. С. 439–447.
9. Amer A., Dubois E. Fast and reliable structure-oriented video noise estimation // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2005. Vol. 15. P. 113–118.
10. Бабаян П.В., Буркина О.Н., Муравьев В.С. Алгоритм проекции времени экспозиции для видеокамер в системе анализа изображений // Сб. докл. 24-й Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – ЦОС-2022». М.: РНТО РЭС им. А.С. Попова, 2022. С. 201–205.
11. Колесникова Т.Н. Анализ шумов электронных схем как эффективное средство обеспечения целостности сигнала // Электронные компоненты. 2018. № 12. С. 18–22.
12. Янчжао В. Исследование влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий при досмотровом контроле объектов: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018. 164 с.
13. Мингазин А.Т. Минимум максимальной взвешенной ошибки аппроксимации АЧХ классических аналоговых и цифровых фильтров // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 4. С. 18–22.
14. Ян Ч. Разработка алгоритмов цифровой обработки данных для радиографических и томографических систем неразрушающего контроля: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2019. 127 с.
15. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
16. Бессонов В.Б. Программно-аппаратные комплексы для микрофокусной рентгеновской компьютерной томографии: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2022. 188 с.
17. Ингачева А.С., Шешкус А.В., Чернов Т.С. и др. Рентгеновский компьютерный томограф – новый инструмент в распознавании // Труды ИСА РАН. 2018. Спецвып. С. 90–95.

References

1. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik RAN*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 27, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.

3. Slavin A.V., Dalin M.A., Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu. Current trends in development of acoustic non-destructive testing methods in aviation industry (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 19, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106.
4. Obukhova N.A., Motako A.A., Pozdeev A.A. Research and development of methods for improving endoscopic (medical) images. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 22–29.
5. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Technosfera, 2019, 1104 p.
6. Yane B. *Digital image processing*. Moscow: Technosfera, 2007, 583 p.
7. Kosarina E.I., Demidov A.A., Mikhaylova N.A., Smirnov A.V. Theoretical aspects when creating electronic reference X-ray images containing quantitative information. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.
8. Lapshenkov E.M. Non-reference estimation of the noise level of a digital image based on harmonic analysis. *Kompyuternaya optika*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 439–447.
9. Amer A., Dubois E. Fast and reliable structure-oriented video noise estimation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, vol. 15, pp. 113–118.
10. Babayan P.V., Burkina O.N., Muravyov V.S. Exposure time projection algorithm for video cameras in the image analysis system. *Collection of reports of the 24th Intern. conf. "Digital signal processing and its application – DSP-2022"*. Moscow: RNTO RES im. A.S. Popova, 2022, pp. 201–205.
11. Kolesnikova T.N. Noise Analysis of Electronic Circuits as an Effective Means of Ensuring Signal Integrity. *Elektronnye komponenty*, 2018, no. 12, pp. 18–22.
12. Yangzhao V. *Investigation of the influence of quantum noise on the quality of material recognition by the dual energy method during inspection control of objects*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Tomsk, 2018, 164 p.
13. Mingazin A.T. Minimum maximum weighted error of approximation of the frequency response of classical analog and digital filters. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2018, no. 4, pp. 18–22.
14. Yan Ch. *Development of algorithms for digital data processing for radiographic and tomographic systems of non-destructive testing*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Tomsk, 2019, 127 p.
15. Kosarina E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A. Digital optical pattern and its dependence on the radiation image at non-destructive testing by method of digital radiography. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
16. Bessonov V.B. *Software and hardware systems for microfocus X-ray computed tomography*: thesis, Dr. Sc. (Tech.). St. Petersburg, 2022, 188 p.
17. Ingacheva A.S., Sheshkus A.V., Chernov T.S. X-ray computed tomograph – a new tool in recognition. *Trudy ISA RAN*, 2018. Special issue, pp. 90–95.

Информация об авторах

Косарина Екатерина Ивановна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Михайлова Наталья Александровна, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Суворов Павел Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Демидов Александр Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ekaterina I. Kosarina, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya A. Mikhaylova, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Pavel V. Suvorov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Demidov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.03.2023.

The article was submitted 21.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 02.03.2023.