

## ВЫЯВЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛИСТА ДИЭЛЕКТРИКА С ПОМОЩЬЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ЛИНЕЙНОГО ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА

*Минин П.В., заместитель директора ООО «КБ «ДОРС», e-mail: p.minin@dors.ru, pminin32@gmail.com*

### DETECTION OF DIELECTRIC SHEET NON-UNIFORMITY WITH CAPACITIVE LINEAR ARRAY SENSOR

*Minin P.V.*

*A new method for detection of a non-uniformity area of dielectric sheet is described where the area has sharp edges. The sheet is passed through a capacitive linear array sensor. Detection is performed using second derivative approach known as Marr-Hildreth algorithm. Smoothing and measurement of thickness gradient is performed in the sensor's hardware followed by computation of divergence of gradient. The sensor contains a single row of flat sensing capacitors. Each pair of adjacent capacitors is connected to a separate differential capacitance converter. The sensitivity to both components of sheet thickness gradient vector is provided thanks to triangular electrode shape of sensing capacitors. The sensor's output is recorded in the form of differential capacitive image, where one of these components is recorded directly while for the other a single-band modulation of spatial carrier frequency is used. The divergence is further calculated by digital filtering. The filter provides demodulation of spatial carrier frequency, calculation of derivatives of gradient components, and their summation. Finally, subpixel interpolation is performed to obtain capacitive image of borders.*

*The size of triangular electrodes of experimental sensor was equal to 12 mm. In the capacitive image of borders acquired, the contour of increased thickness area of the sheet was marked from inside by a bright rim. Areas a few centimeters large were reproduced with correct size and slight distortion of the contour. The very presence of areas from 5 to 10 mm large was detected consistently, but their shape was distorted and the size was bigger than in reality.*

**Key words:** differential capacitive sensor, linear array capacitive sensor, capacitive image, border detection, Laplacian of Gaussian, Marr-Hildreth method, thickness gradient, digital filtering, modulation of spatial carrier frequency.

**Ключевые слова:** дифференциальный емкостной датчик, многоэлементный линейный емкостной датчик, емкостное изображение, обнаружение границы, лапласиан гауссиана, метод Марра-Хилдрет, градиент толщины, цифровая фильтрация, модуляция пространственной частоты.

#### Введение

При неразрушающем контроле неоднородности движущихся листовых объектов применяются различные физические принципы. Наиболее широкое распространение получили контактное механическое измерение толщины, контроль поглощения проходящего оптического излучения и ультразвуковой контроль. В качестве альтернативы, давно привлекает внимание возможность неразрушающего контроля листов диэлектрика с помощью многоэлементного линейного емкостного датчика. Это обусловлено независимостью результатов от оптических и механических свойств листа, а также возможностью работы при высокой скорости его перемещения. По всей видимости, впервые подобный способ контроля был предложен в [1]. В этом патенте описан линейный массив измерительных конденсаторов, через объединенный зазор которых на высокой скорости пропускается контролируемый лист (см. рис. 1). Фактически, по мере движения листа создается строчно-столбцовое емкостное

*Описано выявление неоднородности листа диэлектрика, которая имеет резкие границы. Лист пропускается через линейный дифференциальный многоэлементный емкостной датчик. Для выявления границы неоднородности используется метод Марра-Хилдрет, основанный на производной второго порядка. Сглаживание и получение градиента толщины листа происходит в датчике аппаратным способом, после чего дивергенция градиента определяется вычислительным путем. Датчик содержит один ряд плоских измерительных конденсаторов, попарно подключенных к дифференциальным преобразователям емкости. Пластины конденсаторов, за счет треугольной формы, обеспечивают чувствительность датчика к обоим компонентам вектора градиента толщины листа. Результат измерения регистрируется в дифференциальном емкостном изображении, где один компонент градиента передается напрямую, а для второго используется однополосная модуляция пространственной несущей частоты. Дивергенция вычисляется путем цифровой фильтрации, которая обеспечивает демодуляцию пространственной частоты, дифференцирование компонентов градиента и суммирование производных. Затем производится субпиксельная интерполяция для получения емкостного изображения грани.*

*Экспериментальная проверка производилась с использованием датчика с размером треугольных пластин 12 мм. На полученном емкостном изображении границ область утолщения листа была отмечена яркой каймой, расположенной с внутренней стороны контура этой области. Крупная область размером в несколько сантиметров воспроизводилась с сохранением размера и небольшим искажением формы линий контура. Области размером 5-10 мм устойчиво выявлялись, но с потерей формы и искажением размера в сторону увеличения.*

изображение, где каждая строка пикселей формируется из откликов отдельных конденсаторов линейного массива. С тех пор было предложено множество реализаций этого принципа [2-4]. Несмотря на это, до самого последнего времени, контроль с помощью многоэлементного линейного емкостного датчика не удавалось реализовать в промышленном оборудовании для обработки листов.

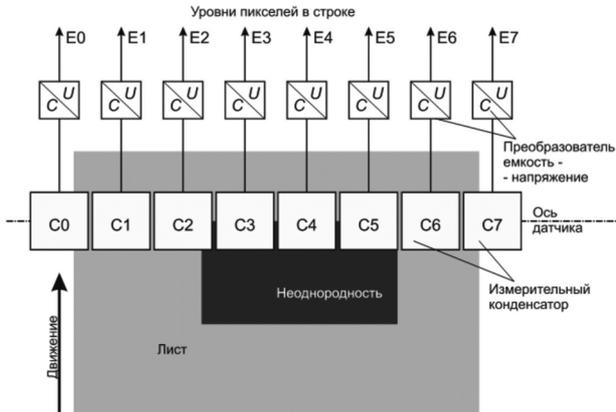


Рис. 1. Получение емкостного изображения движущегося листа [1]

Одна из основных сложностей, с которой приходится столкнуться при использовании емкостного датчика, обусловлена малым относительным изменением емкости измерительного конденсатора при прохождении листа через зазор. Легко показать, что емкость плоского измерительного конденсатора, в зазоре которого находится лист диэлектрика, определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{H - h \frac{\epsilon - 1}{\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $H$  – величина зазора,  $h$  – толщина листа, а  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость. Так, лист бумаги, имеющий  $\epsilon = 2$  и  $h = 100$  мкм, при ширине зазора конденсатора  $H = 1$  мм вызывает изменение емкости конденсатора примерно на 5%. В то же время, влияние механических вибраций в промышленном оборудовании для высокоскоростной обработки листов оказывается весьма велико. В приведенном примере изменение емкости на ту же величину может быть вызвано достаточно небольшим изменением зазора  $H$  за счет вибрации, составляющим 50 мкм. Очевидно, что в таких условиях обеспечение высокой чувствительности датчика к изменению толщины листа требует очень серьезных мер по снижению уровня электрических шумов и помех, повышению разрядности аналого-цифрового преобразования, а также механического уменьшения влияния вибраций. Подобные меры часто оказываются экономически невыполнимыми и препятствуют внедрению емкостных датчиков.

Одно из решений этой проблемы было предложено в [5]. Оно основано на том, что зазор соседних измерительных конденсаторов, при вибрации, изменяется синхронно и практически на одну и ту же величину, что, в соответствии с (1), приводит к синхронному и одинаковому изменению емкости. Поэтому измерение разности емкостей соседних измерительных конденсаторов позволяет обнаружить перепад толщины или диэлектрической проницаемости листа почти без влияния помех, вызван-

ных механическими вибрациями. Кроме того, измерение разности емкостей дает возможность использовать весь динамический диапазон датчика и тракта преобразования для регистрации сигнала, вызванного перепадом толщины. Такой дифференциальный подход (см. рис. 2) позволяет решить широкий круг задач контроля неоднородностей, имеющих резкие границы. В качестве примера подобного контроля, который ежедневно выполняется для миллионов объектов по всему миру, можно привести обнаружение наклейки инородного материала (пленки или бумаги) на банкноту с целью выявления признаков ремонта и подделки.

Граница неоднородности, пересекающая ось дифференциального датчика, вызывает значительную разность емкостей измерительных конденсаторов, расположенных по разные стороны от границы. Однако, если граница образует малый угол с осью датчика, то, при движении листа, неоднородность перекрывает примерно одинаковую площадь пластин обоих измерительных конденсаторов, за счет чего дифференциальный отклик снижается почти до нуля. Поэтому, дифференциальный датчик, показанный на рис. 2, уверенно регистрирует только часть границ и не позволяет целиком восстановить контур неоднородности.

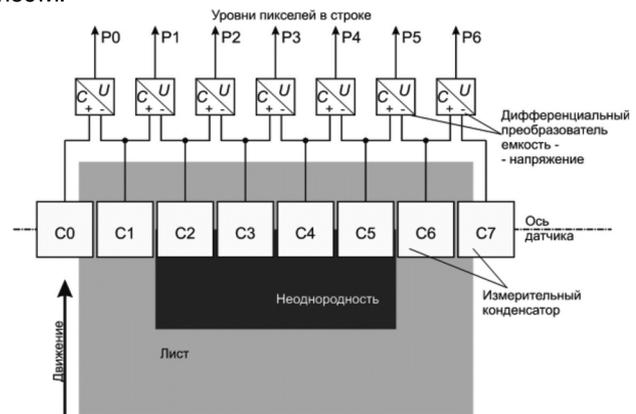


Рис. 2. Получение дифференциального емкостного изображения [5]. Граница регистрируется пикселями P1 и P5, но не регистрируется пикселями P2 – P4 из-за параллельности отрезка границы и оси датчика

### Предлагаемое решение

Одной из причин привлекательности использования дифференциального датчика для обнаружения границ неоднородности является естественное подавление влияния вибраций. При заданной энергии вибрации, амплитуда колебаний будет тем выше, чем ниже их пространственная и/или временная частота. Этот факт определяется природой упругих механических колебаний и приводит к доминированию низких частот в спектре амплитуды вибрации зазора емкостного датчика. В то же время, чувствительность дифференциального датчика к вибрационным помехам, в соответствии со свойствами дифференцирования, при снижении частоты падает.

Среди различных методов выявления границ на изображениях известны подходы, основанные на производных первого и второго порядков, а также дробных порядков [6, 7]. Наиболее широко используются классические методы первого порядка – такие, как операторы Собеля (Sobel),

Прюитт (Prewitt), Робертса (Roberts), Шаппа (Scharf), Кэнни (Canny) и другие. В методах, использующих производные первого порядка, амплитуда отклика на гармонический сигнал пропорциональна частоте, за счет чего происходит подавление низкочастотных помех. Однако, использование методов второго порядка имеет здесь явное преимущество, поскольку амплитуда второй производной гармонического сигнала пропорциональна квадрату частоты.

Классический метод второго порядка, известный как лапласиан гауссиана (LOG, Laplasian of Gaussian) или алгоритм Марра – Хилдрет [8], основан на последовательном применении сглаживания изображения при помощи гауссова фильтра и последующем вычислении лапласиана  $div\ grad = \nabla^2$  сглаженного изображения. Его вполне можно было бы применить в виде вычислительной обработки емкостного изображения, получаемого согласно рис. 1. За счет относительно большого размера зоны чувствительности каждого измерительного конденсатора, при получении емкостного изображения уже обеспечивается сглаживание, сходное с применением гауссова фильтра. Однако, доля динамического диапазона емкостного изображения, занимаемая откликом на прохождение листа, обычно составляет всего несколько процентов, в соответствии с формулой (1). В результате, емкостное изображение сильно искажается электрическими помехами и шумами дискретизации, которые, в ходе вычисления лапласиана, дополнительно подчеркиваются при двойном дифференцировании. Значительно более перспективным представляется перенос первого векторного дифференцирования на аппаратный уровень, где оно может выполняться аналоговым образом при помощи дифференциального датчика, с полезным использованием всего динамического диапазона электрического сигнала.

С точки зрения емкости плоского измерительного конденсатора, изменение диэлектрической проницаемости листа  $\varepsilon$  в формуле (1) эквивалентно изменению его толщины  $h$ . Для описания свойств листа в каждой его точке мы будем использовать эффективную толщину  $h_E$ , которая объединяет в себе геометрическую толщину листа и отклонение локального значения его диэлектрической проницаемости от номинальной величины. Пластина измерительного конденсатора обеспечивает усреднение  $h_E$  по всем точкам в пределах пластины с получением сглаженного значения эффективной толщины  $h_S$ .

Очевидным решением для аппаратного нахождения градиента эффективной толщины может быть датчик с двумя близко расположенными рядами измерительных конденсаторов, изображенный на рис. 3. Для получения компонента градиента в направлении ряда (строчное направление,  $X$ ) дифференциальный чувствительный элемент должен включать в себя два соседних конденсатора одного ряда. Для компонента градиента в направлении перемещения листа (столбцовое направление,  $Y$ ) в чувствительный элемент должны входить два соседних конденсатора из первого и второго рядов. Такой многоэлементный градиентный датчик оказывается сложным и громоздким, так как требует двойного комплекта конденсаторов и дифференциальных преобразователей емкости.

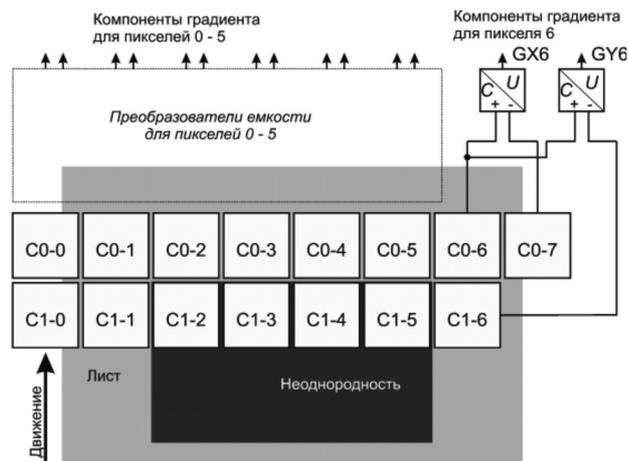


Рис. 3. Двухрядный емкостной датчик градиента толщины

Однако, имеется возможность ограничиться только одним рядом конденсаторов, и все же получать информацию об обоих компонентах градиента. Чувствительность в направлении  $Y$  можно обеспечить за счет формы пластин измерительных конденсаторов. В многоэлементном датчике, показанном на рис. 4, используются треугольные пластины, ориентированные встречным образом в парах, которые образуют отдельный дифференциальный чувствительный элемент. Такая пара обладает чувствительностью к положению границы неоднородности, как в случае ориентации границы по направлению  $X$ , так и по направлению  $Y$ .

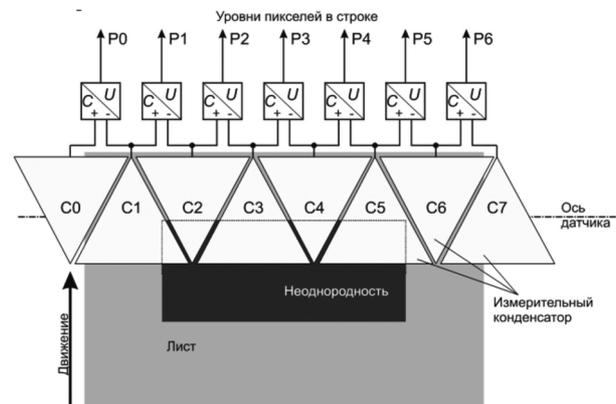


Рис. 4. Дифференциальный датчик с треугольными встречно-ориентированными пластинами (преобразователи емкости показаны только для пикселя 6). Высота каждого треугольника равна длине его основания  $L$

Зависимости дифференциального отклика от положения границы показаны на рис. 5. Они определяются тем, какая доля площади пластин перекрывается неоднородностью. Краевые эффекты приводят к плавным спадам на краях графиков дифференциального отклика. Отметим, что знак отклика дифференциальной пары меняется на противоположный, когда положительная и отрицательная область аппаратной функции меняются местами. За счет этого, знак отклика на границу неоднородности, параллельную оси датчика, у соседних пикселей чередуется.

На рис. 6 и рис. 7 проиллюстрировано формирование строки дифференциального емкостного изображения для двух ортогональных направлений границы неоднородности. Чтобы отобразить как положительные, так и отрицательные значения отклика, интервал уровней яр-

кости пикселей 0 – 255 разделен поровну значением 127, которое соответствует нулевому отклику. Резкую границу неоднородности в виде ступенчатого изменения эффективной толщины  $h_E$  можно рассматривать как двумерный вариант зэта-функции Хевисайда, а отклик в дифференциальном изображении на резкую границу неоднородности – как переходную характеристику датчика для направления по нормали к этой границе.

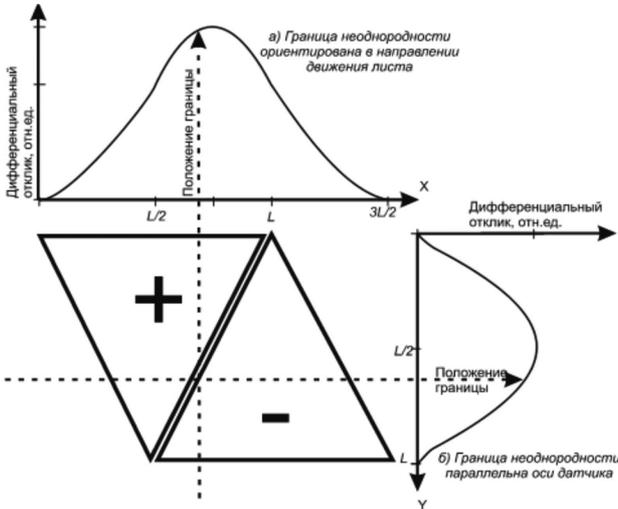


Рис. 5. Отклики дифференциального чувствительного элемента с треугольными встречно-ориентированными пластинами для ортогональных ориентаций границы неоднородности

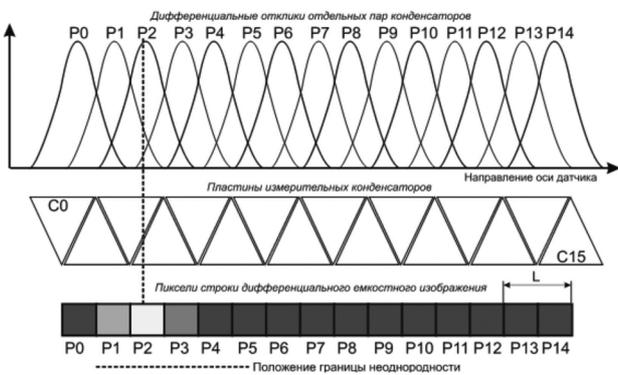


Рис. 6. Формирование строки дифференциального емкостного изображения для случая, когда граница неоднородности ориентирована по направлению движения пласт

Граница, ориентированная по направлению движения листа, отображается в строке либо как положительный, либо как отрицательный пик шириной 3 пикселя. Знак пика определяется тем, с какой стороны от границы находится область повышенной эффективной толщины. Таким образом, когда строка пересекает две границы одной и той же неоднородности, ориентированные по направлению движения листа, в строке возникают два соответствующих пика с противоположным знаком. Это аналогично поведению датчика, изображенного на рис. 2 [5].

Если граница неоднородности ориентирована в направлении оси датчика, то отклики на нее в соседних пикселях чередуются по знаку. Такая граница отображается в строке дифференциального изображения в

виде пространственной частоты с периодом 2 пикселя (в соответствии с терминологией, принятой для дискретных Фурье-преобразований, мы будем ее обозначать как  $1/2p$ ). Эту пространственную частоту логично называть несущей пространственной частотой. Отрезку границы соответствует отрезок пикселей, заполненный несущей частотой  $1/2p$ . Фаза несущей частоты зависит от того, с какой стороны от границы находится область повышенной толщины. Амплитуда отклика максимальна, когда граница проходит по оси датчика, и спадает до нуля при смещении границы к краю пластин, в соответствии с графиком на рис. 5 б.

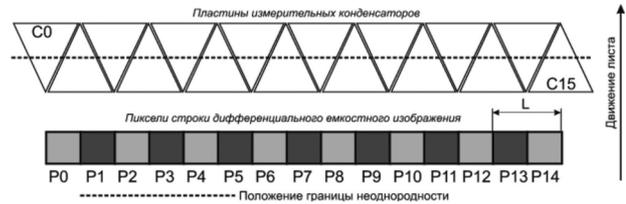


Рис.7. Формирование строки дифференциального емкостного изображения для случая, когда граница неоднородности ориентирована вдоль оси датчика

Таким образом, переходные характеристики датчика как для направления  $X$ , так и для направления  $Y$  имеют характер пиков, что соответствует дифференцированию эффективной толщины листа. Ширина пиков равна  $3/2L$  в направлении  $X$  и  $L$  в направлении  $Y$ , что примерно соответствует размеру области сглаживания эффективной толщины.

Отклики на перепады толщины в направлении движения и в направлении оси имеют линейный характер, формируются независимо и накладываются друг на друга в дифференциальном емкостном изображении. Таким образом, в значениях пикселей строки дифференциального емкостного изображения кодируются оба компонента  $(grad_x[i], grad_y[i])$  приближенного дискретного значения градиента  $grad h_S$  сглаженной эффективной толщины листа  $h_S$ .

Компонент  $grad_x[i]$  напрямую передается в яркости пикселя, а компонент  $grad_y[i]$  кодируется путем модуляции несущей пространственной частоты  $1/2p$ , которую, в терминах теории радиосвязи, можно назвать однополосной. Подобная схема кодирования имеет сходство с кодированием яркостного и цветоразностного компонентов в цветном телевидении в системах PAL и NTSC. Их современные реализации лишь условно можно назвать аналоговыми, поскольку в них используется цифровой синтез композитного аналогового сигнала и его цифровое декодирование [9], [10].

Дифференциальное емкостное изображение можно напрямую использовать для дискретного приближенного вычисления лапласиана, минуя отдельную стадию извлечения компонентов градиента. Дискретным приближением лапласиана, с точностью до постоянного калибровочного коэффициента, характеризующего датчик, является скалярный параметр границы  $B[i, j]$ . Он вычисляется для каждого пикселя на основе дифференциального емкостного изображения, по схеме цифровой фильтрации, показанной на рис. 8.

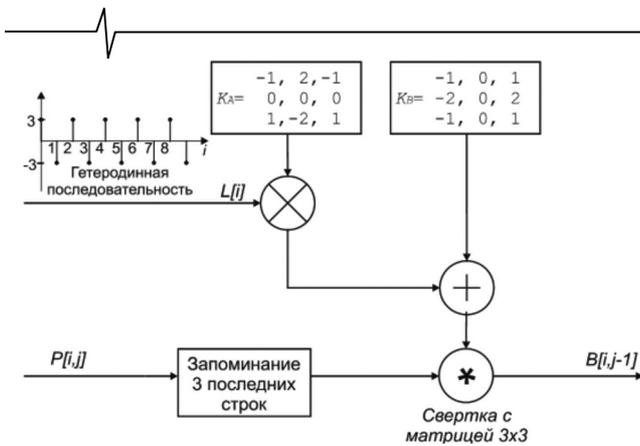


Рис. 8. Схема вычисления параметра границы путем цифровой фильтрации

Схема работает, последовательно получая оцифрованные отсчеты  $P[i, j]$  с датчика с нарастанием номера  $i$  пикселя в строке и с приращением номера строки  $j$  по завершении каждой строки. Знакопеременная последовательность  $L[i]$ , названная гетеродинной, имеет частоту  $1/2p$  и используется для демодуляции несущей пространственной частоты. Противоположные первая и третья строки матрицы ядра  $K_A$ , при свертке со строкой дифференциального изображения, обеспечивают выделение несущей частоты  $1/2p$ . Умножение ядра на гетеродинную последовательность смещает спектральную полосу модулированной несущей частоты вниз на величину  $1/2p$  с обращением относительно нулевой частоты. В результате, первой и третьей строкой декодируются модулирующие значения  $-grad_y[i, j-2]$  и  $grad_y[i, j]$ , соответствующие строкам дифференциального изображения, разнесенным на 2 строчных интервала. То есть, свертка с ядром  $K_A$ , умноженным на  $L[i]$ , дает конечные разности  $grad_y[i, j] - grad_y[i, j-2]$ , приближающие значения частной производной компонента градиента  $\frac{\partial}{\partial y} grad_y h_S$  со смещением на одну строку.

Вместе с этим, противоположные строки ядра подавляют проникновение компонента  $grad_x[i]$ , медленно изменяющегося в направлении  $Y$ .

Ядро  $K_B$  выполняет сглаживание пикселей по трем строкам. Свертка с ним, за счет противоположных первого и третьего столбцов, дает конечную разность, приближающую значения частной производной компонента градиента  $\frac{\partial}{\partial x} grad_x h_S$ . Одновременно, противоположные столбцы ядра, разнесенные на интервал  $2p$ , обеспечивают полное подавление несущей частоты.

В результате суммирования ядер и вследствие линейности свертки, значение  $B[i, j]$  приближает значение лапласиана сглаженной эффективной толщины  $div grad h_S$  с точностью до постоянного калибровочного коэффициента.

На рис. 9, на примере направления оси  $Y$ , пересекающей неоднородность с резкими границами, показано, каким лапласиан сглаженной эффективной толщины изменяется вблизи границ. Локальное значение эффективной толщины  $h_E(y)$ , при сглаживании, переходит в  $h_S(y)$ .

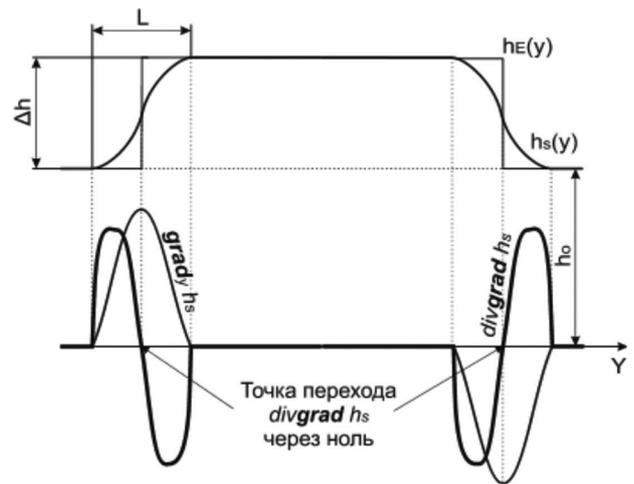


Рис. 9. Формирование лапласиана сглаженной эффективной толщины

Точка перехода  $div grad h_S$  через ноль приходится на максимум градиента, в соответствии с классической теорией Марра-Хилдрет. Таким образом, переход  $B[i, j]$  через ноль может быть использован для определения местоположения границы неоднородности.

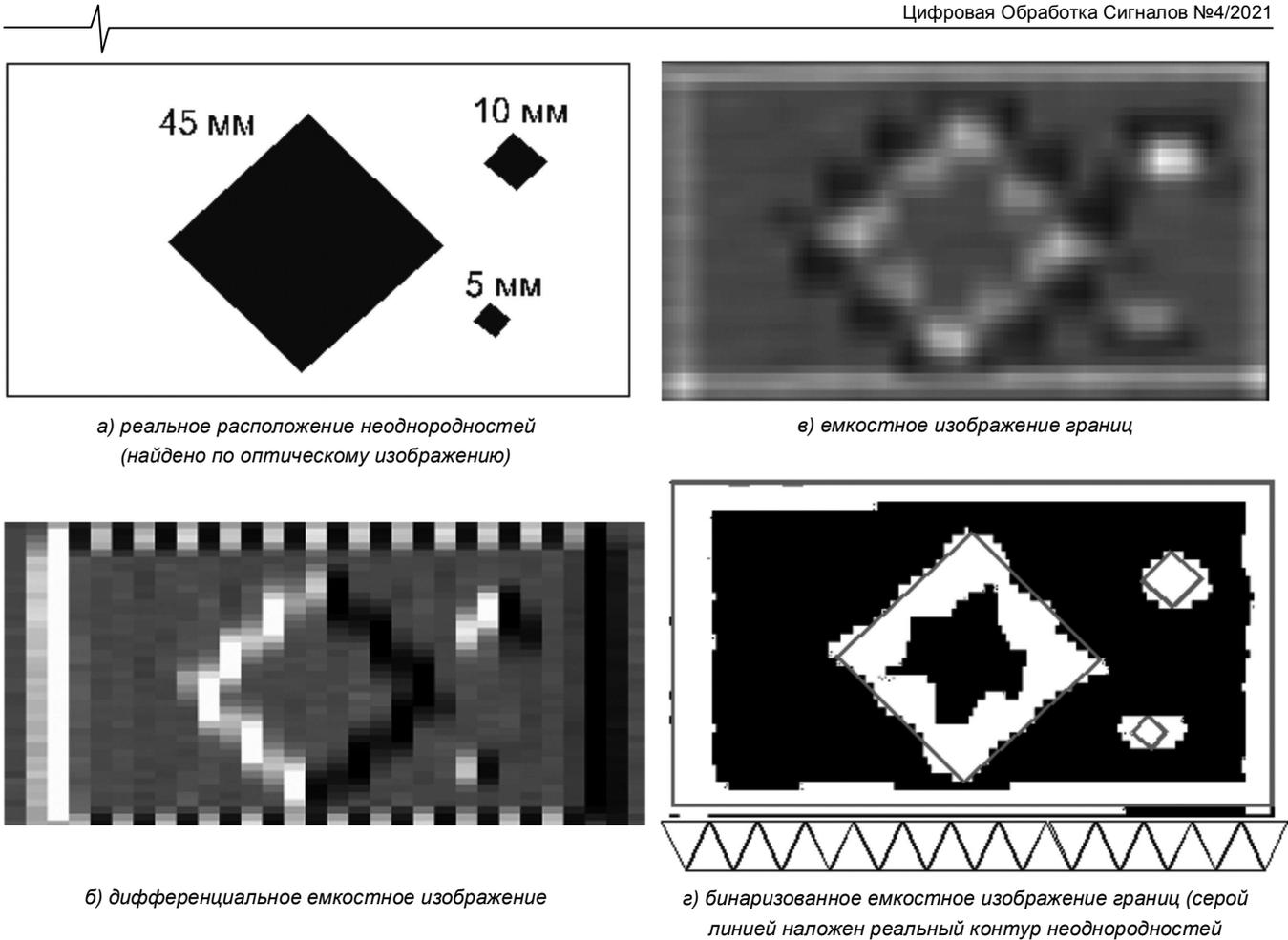
### Экспериментальная проверка

Многоэлементный линейный емкостной датчик, использованный в эксперименте, содержал 34 измерительных конденсатора с треугольными встречно-ориентированными пластинами размером  $L = 12$  мм. В качестве носителя датчика использовался опытный образец счетно-сортировальной машины для обработки банкнот. Он обеспечивал прохождение листа через датчик на скорости 2 м/с.

В качестве тестовых мишеней использовались листы бумаги с номинальной толщиной 100 мкм. Нормированные неоднородности создавались наклеиванием кусков пленки из поливинилхлорида (PVC) толщиной 60 мкм, имеющих различные формы и размеры.

Вычислительная система носителя, построенная на основе двухъядерного процессора обработки сигналов ADSP-BF607 фирмы Analog Devices, работающего на частоте 500 МГц, осуществляла получение данных с множества датчиков машины и их вычислительную обработку. В том числе, вычислительная система через каждые 2 мм смещения листа принимала данные регистрации строки с емкостного датчика. Обработка данных велась в реальном времени, по отдельным строкам, согласно схеме, показанной на рис. 8.

Возможности для существенного уменьшения размера пластины  $L$  физически ограничены из-за сложностей преобразования очень малых емкостей измерительного конденсатора, а также во избежание резкого роста влияния краевых эффектов. Поэтому, дифференциальное емкостное изображение имеет крупный размер пикселя по  $X$ , равный  $L/2 = 6$  мм. Размер пикселя по  $Y$  определяется шагом смещения листа между регистрацией соседних строк и не столь существенно ограничен. Этот размер был намеренно выбран значительно меньше размера по  $X$ , чтобы повысить общее разрешение дифференциального емкостного изображения.



а) реальное расположение неоднородностей  
(найдено по оптическому изображению)

в) емкостное изображение границ

б) дифференциальное емкостное изображение

г) бинаризованное емкостное изображение границ (серой линией наложен реальный контур неоднородностей)

Рис. 10. Результаты прохождения тестовой мишени через носитель.

Под изображением, с сохранением масштаба, добавлены контуры пластин датчика)

Амплитуда гетеродинной последовательности  $L[i]$  была выбрана равной 3. Такое значение определяется соотношением размеров пикселя и обеспечивает равную чувствительность как к перепадам эффективной толщины, направленным по направлению движения листа, так и к перепадам, параллельным оси датчика.

Дополнительно к этому, для проверки возможностей работы в субпиксельном режиме, массив  $B[i, j]$  интерполировался к размеру пикселя  $1 \times 1$  мм. По направлению строки выполнялась линейная интерполяция, а по направлению листа строки просто повторялись дважды. В результате, получалось емкостное изображение границ, имеющее ту же дискретность, что и оптические изображения листа, регистрируемые при помощи датчиков носителя. Это позволило совмещать емкостное и оптическое изображения в одном масштабе.

Вычислительная обработка по схеме, показанной на рис. 8, вместе с интерполяцией занимала примерно 3 % тактов одного ядра процессора в момент прохождения мишени через емкостной датчик.

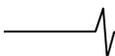
На рис. 10 показан пример оптических и емкостных изображений, совместно полученных при прохождении тестовой мишени через носитель.

На дифференциальном емкостном изображении (рис. 10б), по верхней и нижней кромкам листа, видны сплошные полосы, заполненные пространственной частотой  $1/2p = 1/12 \text{ мм}^{-1}$ . Между фазой пространственной частоты на верхней и нижней кромках наблюдается сдвиг 1800. Здесь пространственная частота передает компоненту

градиента эффективной толщины по  $Y$ . Вдоль правой и левой кромки листа расположены темная и светлая полосы, что соответствует компоненте градиента по  $X$ . Крупная неоднородность в виде квадрата со стороной 45 мм представлена широкими полосами вдоль ее границ, в которых более яркий или более темный средний фон совмещен с заполнением пространственной частотой  $1/2p$ . Такие полосы передают градиент с примерно равными компонентами по  $X$  и по  $Y$ .

На емкостном изображении границ (рис. 10 в), вдоль контура крупной неоднородности, с внутренней стороны проходит светлая кайма шириной примерно 6 – 9 мм. Такая же кайма проходит с внутренней стороны контура листа. Напротив, с внешней стороны крупной неоднородности проходит темная кайма. С уменьшением размера неоднородности внутренняя кайма сливается в непрерывную область. В случае малых неоднородностей с длиной стороны 5 и 10 мм (то есть, меньше  $L$ ), на месте неоднородности присутствует светлая область, но темные участки рядом с ней не образуют непрерывную внешнюю кайму. Дополнительно к этому, в экспериментах было показано, что, для неоднородностей с уменьшенной толщиной  $h_E$ , внутренняя кайма оказывается темной, а внешняя – светлой.

На бинаризованном изображении границ (рис. 10 г), форма крупной неоднородности передана с небольшими искажениями. Наблюдается волнистость линии контура с горизонтальным шагом  $L$ , которая отсутствует на мишени и не видна на бинаризованном оптическом изображении. Форма малых неоднородностей практически утрачена, но



передан сам факт наличия неоднородности. Без интерполяции, искажения контура оказываются значительно большими и содержат ступени размером  $L/2$  (на рисунке вариант без интерполяции не показан).

Также, была проведена простая проверка наличия перекрестных связей между направлениями  $X$  и  $Y$  при получении  $B[i, j]$ . Для прямоугольной неоднородности, сторона которой параллельна оси датчика, при вычислительной обработке сначала использовалось ядро  $K_A = 0$ , а затем  $K_B = 0$ . Обнуление соответствующего ядра эквивалентно отключению обработки того или иного компонента градиента. Это привело, соответственно, сначала к полному исчезновению участков светлой и темной каймы границы, параллельной  $X$ , а затем, к полному исчезновению участков светлой и темной каймы в перпендикулярном направлении. При исчезновении участка каймы, перпендикулярный ему участок каймы оставался без изменений. Это позволяет говорить о том, что, в первом приближении, заметные перекрестные связи между направлениями  $X$  и  $Y$  отсутствуют.

### Заключение

Предложенный подход позволяет, при помощи емкостного изображения границ, выявить крупные неоднородности (размером больше  $L$ ), передать их форму и размеры. Для малых неоднородностей (размером меньше  $L$ ) можно выявить сам факт их присутствия. Искажения формы контура неоднородности связаны с крупным шагом пикселей в строке емкостного дифференциального датчика и частично исправляются за счет субпиксельной интерполяции. Передаваемый размер малых неоднородностей несколько завышен, что может быть полезно при неразрушающем контроле для повышения выявляемости дефектов. Для будущих исследований важно рассмотреть пути уменьшения искажений формы как за счет иной вычислительной обработки, так и, возможно, иной формы пластин конденсаторов датчика.

Предложенная схема вычислительной обработки имеет невысокую вычислительную сложность, занимает небольшой объем памяти данных и мало нагружает процессор для обработки сигналов.

Одним из главных недостатков алгоритма LOG обычно называют множество ложных срабатываний, возникающих из-за неоднозначности условий перехода лапласиана через ноль. На оптических изображениях высокого разрешения с обилием мелких контрастных деталей и шумов этот недостаток существенно ограничил применимость LOG и потребовал разработки специальных алгоритмов для устранения неоднозначности, таких как алгоритм Линдеберга [11]. Однако, как показали наши эксперименты, емкостное изображение границ не склонно к появлению ложных срабатываний. Это преимущество, по всей видимости, можно считать оборотной стороной такого недостатка емкостного способа получения изображения, как низкая разрешающая способность и отсутствие мелких контрастных деталей.

Широкая кайма с шириной в пределах  $0,5L - 0,75L$ , наблюдаемая на емкостном изображении границы и примыкающая изнутри к контуру неоднородности, представляет собой устойчивый признак, по которому этот контур можно найти и измерить с помощью общеизвестных методов обработки изображений.

Однако, в ходе последующих исследований имеет смысл рассмотреть потенциально более точный подход, основанный на двумерной версии формулы Остроградского-Гаусса. Вполне естественно считать, что контур неоднородности проходит по точкам с максимальным градиентом сглаженной эффективной толщины  $grad h_s$  (как, например, показано на рис. 9). Тогда, этот контур можно искать вариационным способом по максимуму потока градиента, пересекающего контур. Формула Остроградского-Гаусса позволяет вместо вычисления потока градиента через контур  $C$  находить интеграл изображения границы по площади, охватываемой контуром  $C$ . Вычислительная максимизация интеграла по площади при изменении охватываемого контура  $C$  позволяет, в итоге, найти контур неоднородности. Этот подход, в частности, был рассмотрен Василевским и Сиддики [12] для изображений, получаемых в медицинских методах визуализации. Как представляется, он также мог бы оказаться плодотворным и в случае емкостного изображения.

Результаты данной работы легли в основание патента [13].

### Литература

1. Jeanneau D., Poilleux J. Device for checking the thickness of dielectric sheet material. European Patent EP0097570B1. IPC G01B7/06. Published 02.09.1987.
2. Hisaaki M., Ryosuke K., Koji Y. Device for detecting abnormality of thickness of sheet paper or the like. Japanese patent JP2814087B2. IPC G01B7/06. Published 22.10.1998.
3. Ueoka T. Paper sheet thickness detecting sensor and banknote classifying unit. USA Patent US10269200B2. IPC G01V3/00. Published 23.04.2019.
4. Film thickness detection device. USA Patent US10746524B2. IPC G01R27/08. Published 18.08.2020.
5. Минин П.В., Дюмин М.И., Ушкалова И.В. Способ обнаружения неоднородностей листа и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации на изобретение №2483276. МПК G01B7/06. 2013. Бюл. № 15.
6. Shrivakshan G.T., Chandrasekar C. A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing. // International Journal of Computer Science. 2012. Vol. 9. № 5. Pp. 269-276.
7. Georgescu C. Improved Edge Detection Algorithms Based on a Riesz Fractional Derivative. // Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Image Analysis and recognition. – Springer, 2018. Pp. 201-209.
8. Marr D., Hildreth E. Theory of Edge detection. Proceedings of Royal Society. London, 1980. Vol. 207. № 1167. Pp.187-217.
9. Slattery B. Advanced Digital Video Encoders. //Analogue Dialogue. 1996. Vol. 30. № 4. Pp. 9-10.
10. Sacca F. Software decoding of composite video without a phase-locked loop. USA Patent US7027102B2. IPC H04N9/67. Published 11.04.2006.
11. Lindeberg T. Edge detection and ridge detection with automatic scale selection. //International Journal of Computer Vision. 1998. Vol. 30. № 2. Pp. 117-154.
12. Vasilevskiy A., Siddiqi K. Flux Maximizing Geometric Flows. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. Vol. 24. № 12. Pp. 1565-1578.
13. Минин П.В., Камбалин С.В. Устройство для обнаружения неоднородности тонкого объекта, имеющей резкие границы, и способ его применения. Патент Российской Федерации на изобретение №2721099. МПК G01B7/06. 2020. Бюл. № 14.