

# Расчет размеров объекта и вокселя при рентгеновской томографии

Томография существенно расширяет возможности рентгеновского контроля печатных плат, компонентов, паяных соединений. Основными принципиальными ограничениями в применении томографии являются максимальные размеры контролируемого объекта и размер вокселя (трехмерного пикселя), служащий показателем детализации полученной 3D-модели. Расчету этих параметров и посвящена данная статья. Публикация ориентирована на специалистов, занимающихся рентгеновским контролем, и предназначена оказать помощь при оптимальном выборе оборудования рентгеновского контроля для решения поставленных задач.

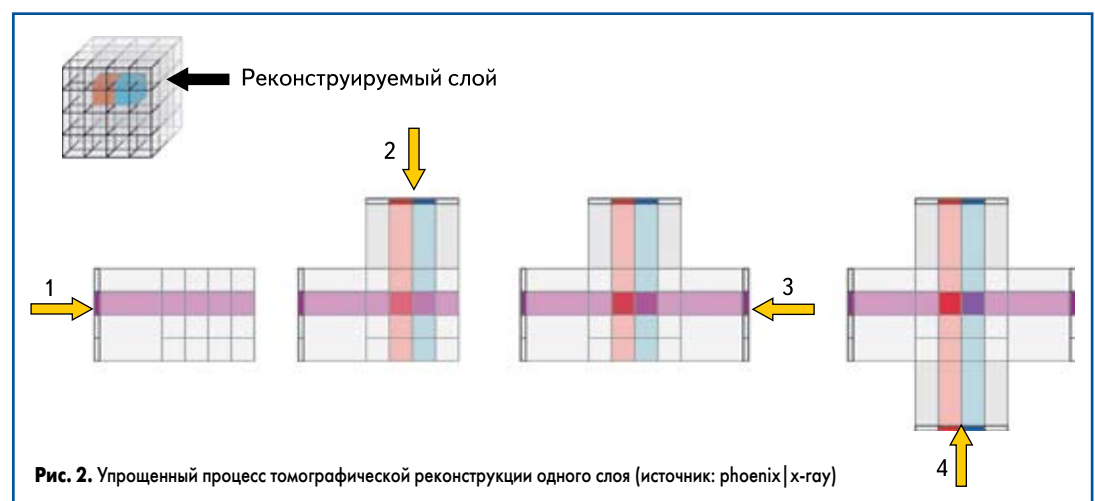
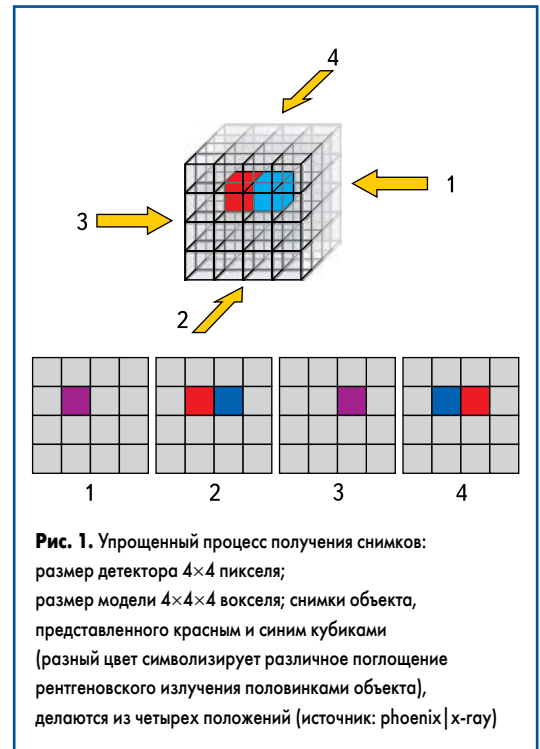
Антон Нисан

edu@ostec-group.ru

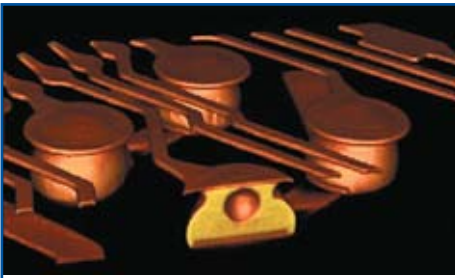
## Принцип томографии

Томография позволяет получить трехмерную модель исследуемого объекта, а также его сечения любыми плоскостями. Томографическое исследование состоит из трех основных этапов:

1. Получение снимков объекта. Исследуемый объект, помещенный между источником и детектором, автоматически поворачивается с небольшим шагом вокруг оси на  $360^\circ$  (рис. 1). При этом в каждом положении делается снимок объекта\*. Для получения модели всего объекта необходимо, чтобы он полностью присутствовал на всех снимках. Общее число положений, в которых делаются снимки объекта, выбирается в зависимости от количества пикселей детектора, требуемого качества модели и может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч.
2. Томографическая реконструкция. На этом этапе обрабатываются полученные рентгеновские снимки объекта и генерируется трехмерная модель объекта, то есть в каждой точке (вокселе) трехмерного пространства, в которой производится реконструкция, определяется значение по шкале серого, отражающее ослабление рентгеновского излучения соответствующим фрагментом объекта (рис. 2).



\* Для обеспечения максимального качества модели при получении снимков объект совершает полный оборот на  $360^\circ$ . Однако возможно выполнить томографию, не совершая полного оборота исследуемого объекта. Это позволяет получать модель объекта большего размера при меньшем вокселе, но может отрицательно сказаться на качестве модели. В этой статье такой способ не рассматривается.



**Рис. 3.** 3D-модель паяных соединений компонента BGA. Томография выполнялась на системе panotom производства phoenix|x-ray (источник: phoenix|x-ray)

3. Исследование модели объекта. На этом этапе переходят к работе с полученной моделью, для чего используется специальное программное обеспечение, например VG Studio MAX. Для удобства восприятия шкале серого можно поставить в соответствие произвольную цветовую шкалу или, другими словами, определенным градациям серого присвоить требуемый цвет, при этом возможны градиентные переходы (рис. 3, табл. 1).

Разделяют два типа установок, позволяющих проводить томографическое исследование: рентгеновские томографы и системы 2D-контроля с томографическими возможностями.

1. Рентгеновские томографы. Системы этого типа специально разработаны для проведения томографии, они оснащаются большими детекторами с малым размером пикселя. Оптимальны для проведения томографии, но не предназначены для 2D-контроля.
2. Системы 2D-контроля с томографическими возможностями. Как и следует из названия, эти системы ориентированы на 2D-контроль, и их томографические возможности заметно скромнее, чем у полноценных томографов.

**Постановка задачи**

Сформулируем задачу следующим образом: для заданной конфигурации системы рентгеновского контроля найти диапазон размеров объектов, которые могут быть исследованы, и соответствующие размеры вокселя полученной модели (табл. 2).

**Таблица 2.** Условные обозначения исходных данных и искомого величин

Параметр	Обозначение
Исходные данные	
Ширина детектора	$w_d$
Длина детектора	$l_d$
Расстояние от трубки до детектора	$H$
Расстояние от трубки до оси вращения исследуемого объекта	$g$
Минимальный зазор между трубкой и объектом (детектором и объектом) для обеспечения возможности полного оборота объекта	$d$
Размер пикселя детектора	$p$
Требуется найти	
Ширина объекта	$w_o$
Длина объекта	$l_o$
Размер вокселя	$v$

**Таблица 1.** Сравнение результатов томографического исследования печатного узла

Модель установки	microme x	panotom
Тип установки	Система 2D-контроля с томографическими возможностями	Рентгеновский томограф
Размер вокселя полученной модели, мкм	13,9	5
Минимальный диаметр отчетливо различимых пустот в паяных соединениях, мкм	32	12
Минимальная ширина отчетливо различимой трещины в корпусе компонента, мкм	20	9

**Принятые допущения**

При определении размеров объекта и вокселя будем использовать следующие допущения:

1. Исследуемый объект имеет форму прямоугольного параллелепипеда, высотой которого можно пренебречь. Примером такого объекта служит печатная плата.
2. Объект вращается на 360°.
3. Рентгеновская трубка и детектор в процессе томографии неподвижны.
4. Объект закреплен в держателе по центру.
5. Необходимо получить модель всего объекта, а не его части.

**Вывод формул для расчета размеров объекта и вокселя**

Исходя из подобия треугольников ABC и AED (рис. 4):

$$\frac{BC}{DE} = \frac{AB}{AE},$$

откуда:

$$BC = \frac{AB \times DE}{AE} = \frac{g w_o}{2 \sqrt{H^2 + \frac{w_o^2}{4}}} = \frac{g w_o}{\sqrt{4H^2 + w_o^2}}.$$

Зная BC, найдем ширину объекта:

$$w_o = 2BC = \frac{2g w_o}{\sqrt{4H^2 + w_o^2}}. \quad (1)$$

Исходя из подобия треугольников AFG и AJK:

$$\frac{l_o}{l_o} = \frac{g - \frac{w_o}{2}}{H},$$

откуда:

$$l_o = \frac{(g - \frac{w_o}{2}) l_o}{H}. \quad (2)$$

Подставив (1) в (2), найдем длину объекта:

$$l_o = \frac{g l_o}{H} = \frac{g w_o l_o}{H \sqrt{4H^2 + w_o^2}}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что при вращении на 360° исследуемый объект не должен задевать рентгеновскую трубку и детектор, получим следующие ограничения на размеры объекта:

- $w_o < 2(g - d)$ ;
- $w_o < 2(H - g - d)$ ;
- $l_o < 2(g - d)$ ;
- $l_o < 2(H - g - d)$ .

Данные рассуждения справедливы для объекта, толщиной которого можно пренебречь. Если необходимо учесть толщину объекта  $h_o$ , то формула для расчета ширины объекта  $w_o'$  будет иметь следующий вид:

$$w_o' = \sqrt{w_o^2 - h_o^2} = \sqrt{\frac{4g^2 w_o^2}{4H^2 + w_o^2} - h_o^2}.$$

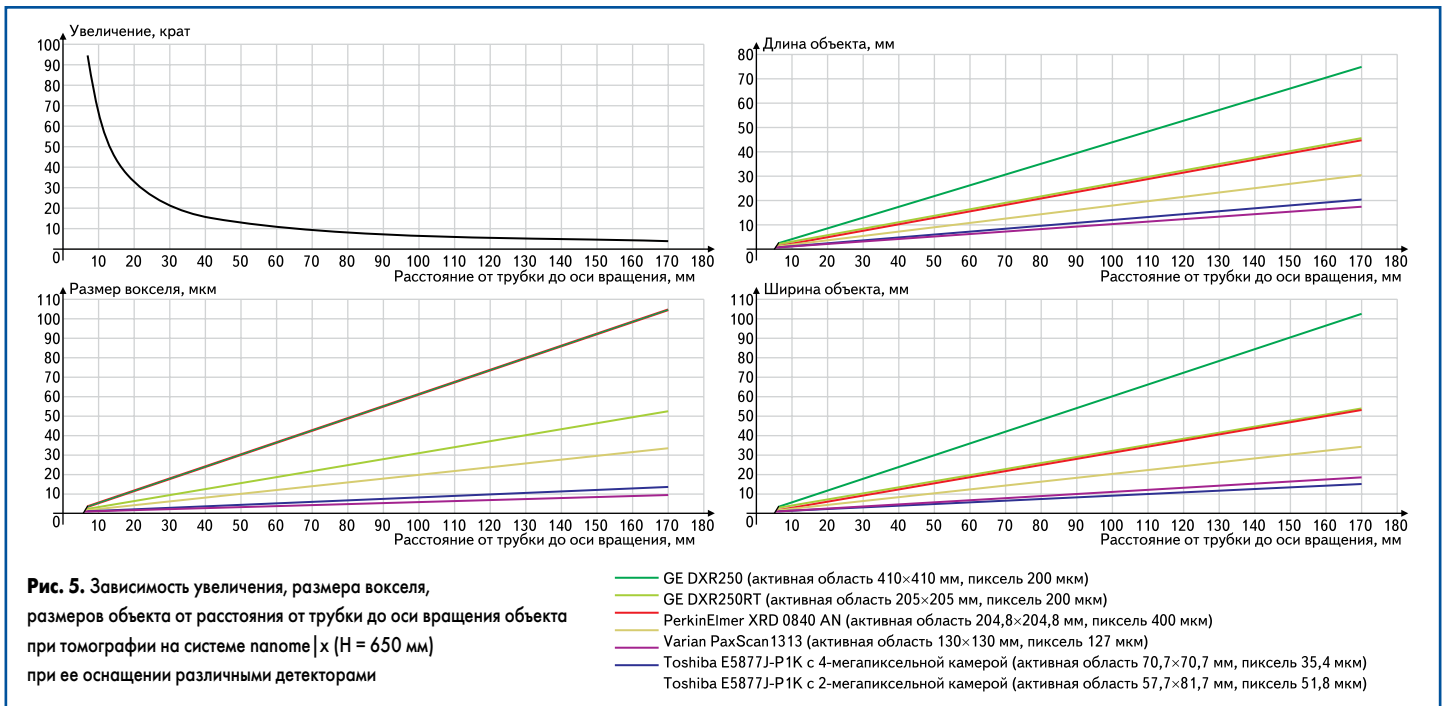
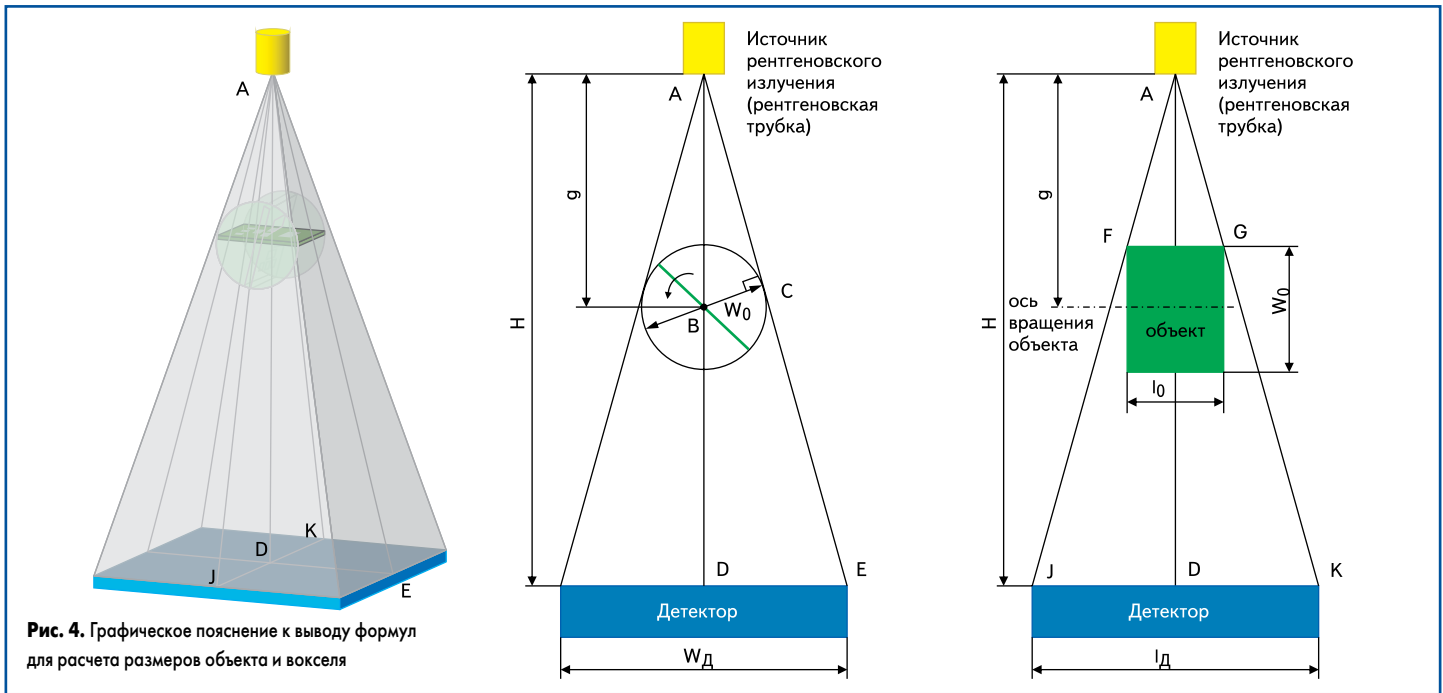
Размер вокселя рассчитывается как отношение размера пикселя к геометрическому увеличению  $M$  ( $M = H/g$ ):

$$v = \frac{p}{M} = \frac{p g}{H}. \quad (4)$$

**Расчет на примере системы 2D-контроля с томографическими возможностями panotom|x**

Из выражений (1), (2) и (4) следует, что при заданной конфигурации системы ( $H, w_d, l_d, p$  — константы) размеры объекта и вокселя зависят только от расстояния от трубки до оси вращения объекта  $g$ . Поэтому, подставив максимальное значение  $g$  в эти выражения, можно определить максимальные размеры исследуемого объекта и размер вокселя в модели такого объекта.

Проиллюстрируем результаты расчета на графиках зависимости ширины и длины объекта,



а также размера вокселя от расстояния от трубки до оси вращения объекта при оснащении системы папоте|x различными детекторами (табл. 3). Для наглядности также построим график зависимости увеличения от расстояния от трубки до оси вращения объекта (рис. 5).

Графики, приведенные на рис. 5, позволяют легко сопоставить размеры объекта с разме-

ром вокселя модели. Например, для системы папоте|x с детектором GE DXR250RT ширина объекта в миллиметрах примерно равна размеру вокселя в микронах (при томографии объекта шириной 50 мм размер вокселя модели объекта составит 50 мкм). С другой стороны, если требуется получить модель с размером вокселя не более 20 мкм, то для рассматриваемой кон-

фигурации системы это возможно только для объектов шириной не более 20 мм.

В заключение хочется отметить, что томография с использованием аналоговых детекторов хотя и возможна, но имеет очень узкую область применения — исследование объектов малого размера: в рассматриваемом примере — объектов шириной менее 20 мм. Оснащение систем 2D-контроля цифровым детектором позволит проводить томографию объектов с размерами в несколько раз больше. Но все же максимальные возможности томографии раскрываются только при использовании полноценных томографов!

**Примечание.** С видеоматериалами к статье вы можете ознакомиться на нашем видеоканале в Интернете: <http://www.youtube.com/ostecgroup> (видеоролики «Лазерный диод», «Алюминиевое литье», «Чип-индуктивность», «Шариковые выводы компонента BGA»).

Таблица 3. Параметры детекторов, которые могут быть установлены в систему рентгеновского контроля папоте|x

Производитель	Модель	Тип	Размер активной области, мм	Количество пикселей, шт.	Размер пикселя, мкм
GE	DXR250	Цифровой	410×410	2048×2048	200
GE	DXR250RT	Цифровой	205×205	1024×1024	200
Varian	PaxScan1313	Цифровой	130×130	1024×1024	127
PerkinElmer	XRD 0840 AN	Цифровой	204,8×204,8	512×512	400
Toshiba	E5877J-P1K с 4-мегапиксельной камерой	Аналоговый	70,7×70,7	2000×2000	35,4
Toshiba	E5877J-P1K с 2-мегапиксельной камерой	Аналоговый	57,7×81,7	1130×1600	51,8