

БИОТЕХНОСФЕРА

№ 3/33/2014

1 Материалы
Russian-German conference
on Biomedical Engineering



ТЕМА НОМЕРА:

X Российско-Германская
конференция
по биомедицинской
инженерии
25–27 июня 2014 года

БИОТЕХНОСФЕРА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЛИТЕХНИКА»

ISSN 2073-4824

16+

ISSN 2073-4824



9 772073 482007

УДК 616-073.75:681.32

А. И. Мазуров, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель Генерального директора по науке, НИПК «Электрон», Санкт-Петербург

Н. Н. Потрахов, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина)»

Пространственная разрешающая способность цифровых рентгеновских аппаратов

Ключевые слова: цифровые рентгеновские аппараты, пространственная разрешающая способность, микрофокусная рентгенография, глубина резкости.

Keywords: digital x-ray machines, nonplanar resolution, microfocus x-ray, depth of field.

Рассматриваются вопросы обеспечения высокой пространственной разрешающей способности цифровых рентгеновских аппаратов. Показано, что оснащение цифровых рентгенодиагностических комплексов микрофокусными излучателями для прицельных снимков с увеличением изображения области интереса повышает их диагностические возможности по распознаванию мелких структур.

Введение

За последние несколько десятилетий рентгено-техника претерпела глубокие изменения, связанные с широким использованием цифровых технологий визуализации скрытого рентгеновского изображения. В связи с этим изменился ряд требований к параметрам рентгеновских аппаратов, в частности к пространственной разрешающей способности цифровых приемников рентгеновских изображений для общей рентгенографии. Цифровые рентгенографические приемники большинства фирм-изготовителей имеют размер пиксела от 125 до 200 мкм, что определяет частоту дискретизации (частота Найквиста) от 3,5 до 2,5 пер/мм. Известно, что частота Найквиста в цифровых приемниках ограничивает спектр пространственных частот визуализируемого рентгеновского изображения. Соответственно, составляющая спектра выше частоты Найквиста должна быть подавлена, так как она вносит артефакты в получаемое изображение [1].

Однако рентгенография на пленку с усиливающими экранами имеет разрешение от 5 до 10 пер/мм. Возникает вопрос, чем обусловлено такое снижение требований к разрешению цифровых приемников по сравнению с пленочным?

Материалы и методы

Ответ на поставленный вопрос можно получить, используя соотношение для пространственной разрешающей способности R_a аппарата в целом при рентгенографии неподвижных органов [2]:

$$R_a = R \frac{m}{\sqrt{1 + (m - 1)^2 (fR)^2}}, \quad (1)$$

где R — разрешающая способность приемника; m — коэффициент увеличения изображения объекта; f — размер фокусного пятна рентгеновской трубки.

На рис. 1 представлена зависимость пространственной разрешающей способности «пленочного» аппарата с разрешением приемника $R = 5$ пер/мм

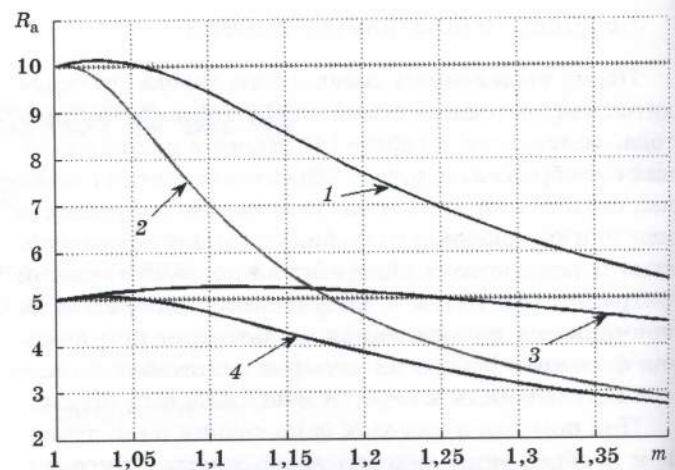


Рис. 1 Зависимость разрешающей способности рентгеновского аппарата R_a от коэффициента увеличения изображения объекта m :

1 — $f = 0,6$ мм, $R = 10$ мм⁻¹, $fR = 6$; 2 — $f = 1,2$ мм, $R = 10$ мм⁻¹, $fR = 12$; 3 — $f = 0,6$ мм, $R = 5$ мм⁻¹, $fR = 3$; 4 — $f = 1,2$ мм, $R = 5$ мм⁻¹, $fR = 6$

и $R = 10$ пер/мм и фокусным пятном рентгеновской трубки $f = 0,6/1,2$ мм от коэффициента увеличения m . Трубки с таким фокусным пятном используются в большинстве аппаратов для стандартной рентгенографии.

На рисунке видно, что разрешающая способность «пленочных» приемников определяет разрешающую способность аппарата только при очень малых значениях m . Диапазон увеличений, начиная от $m = 1$, при котором разрешение аппарата R_a не опускается ниже разрешения приемника ($R_a \geq R$), называется глубиной резкости рентгеновского аппарата. В соответствии с уравнением (1) выражение для глубины резкости можно записать в виде

$$m = \frac{(fR)^2 + 1}{(fR)^2 - 1} \quad (2)$$

Ниже приведена глубина резкости «пленочного» аппарата в стандартной рентгенографии.

R , пер/мм. . .	5	5	10	10
f , мм	0,6	1,2	0,6	1,2
Rf	3	6	6	12
m_{\max}	1,250	1,057	1,057	1,007

Естественно, что резкость изображения желательно сохранить по всей толщине Z просвечиваемого объекта. В этом случае геометрия съемки (рис. 2) должна рассчитываться, исходя из уравнения

$$m_{\max} = \frac{F}{F - (a_{\min} + z)} \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) получим

$$F = \frac{a_{\max}}{2} [(fR)^2 + 1], \quad (4)$$

где $a_{\max} = a_{\min} + Z$.

В современных аппаратах для стандартной рентгенографии (контактная съемка) при просвечивании «толстых» пациентов принято, что $a_{\max} \approx 30$ см.

Ниже приведены требования к фокусному расстоянию F [см. выражение (4)], при котором резкость изображения сохраняется по всей «толщине» такого пациента.

fR	3	6	12
F , см	150	555	2175

Только для условия $fR = 3$ фокусное расстояние, равное 150 см, может быть выдержано. Другие фокусные расстояния (5 и более метров) не могут быть обеспечены по конструктивным соображениям, в том числе из-за отсутствия рентгеновских трубок сверхвысокой мощности. (Как известно, интенсивность рентгеновского излучения в плоскости детектора обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния.) Следовательно, глубина резкости «пленочных» аппаратов не охватывает всего диапазона значений толщины исследуемых объектов.

Иначе говоря, если требовать приблизительно одинакового разрешения по всей толщине объекта, то при выбранной рентгеновской трубке с $f = 0,6/1,2$ мм разрешение рентгенографического комплекта (пленка+усиливающий экран) является избыточным. Уменьшая R , можно получить более равномерное разрешение по толщине объекта. Учитывая этот факт, а также такие факторы как снижение чувствительности детектора, которое обратно пропорционально четвертой степени размера вокселя, и снижение фил-фактора, разработчики плоскопанельных приемников изображения снизили их разрешение по сравнению с рентгенографическими комплектами приблизительно в 2 раза.

Таким образом, повсеместная замена пленки с усиливающим экраном цифровыми приемниками породила проблему выявления высокодетальных

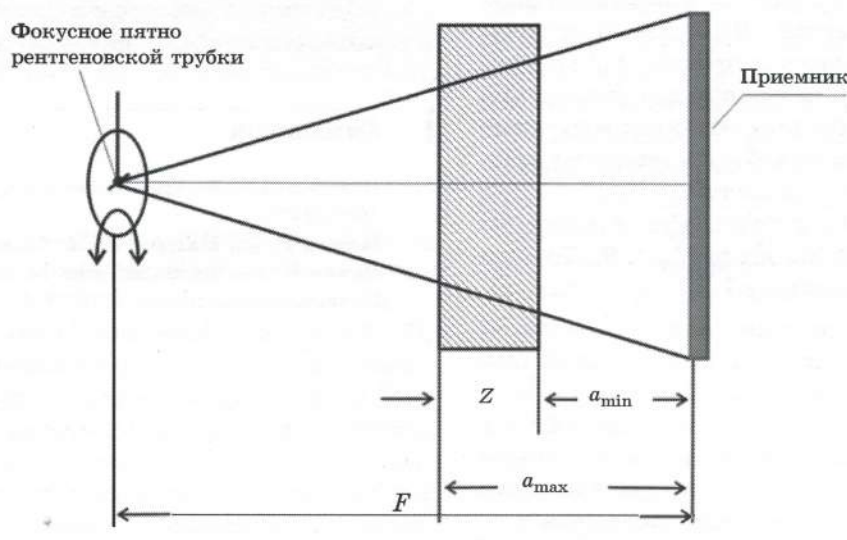


Рис. 2 | К определению фокусных расстояний F

структур и мелких новообразований в исследуемых органах, пространственные частоты которых простираются выше 3,5 пер/мм. Выход из этого положения представляется в уменьшении фокусного пятна рентгеновской трубки.

Известно [2], что при заданном фокусном пятне рентгеновской трубки f и разрешении приемника R существует оптимальное увеличение изображения

$$m_{\text{opt}} = \frac{(fR)^2 + 1}{(fR)^2}, \quad (5)$$

при котором обеспечивается максимальная разрешающая способность аппарата

$$R_{\text{max}} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{f^2}} = R\sqrt{m_{\text{opt}}}. \quad (6)$$

Ниже приведены рассчитанные по соотношению (6) максимальные значения разрешения аппаратов в зависимости от размеров фокусного пятна рентгеновской трубки при $R = 3,5$ пер/мм.

f , мм	1,2	0,6	0,3	0,1
m_{opt}	1,06	1,23	1,91	9,16
R_{max}	3,56	4,20	4,83	10,59

Результаты и обсуждение

При рентгенографии неподвижных объектов разрешающая способность аппарата может быть как меньше, так и больше разрешающей способности приемника. Критерием для оценки разрешения аппарата в целом может служить произведение fR .

При контактной рентгенографии выполняется условие $fR > 1$. Для этого режима съемки разрешающая способность аппарата R_a , начиная с коэффициента увеличения изображения $m = 1$, возрастает по отношению к разрешающей способности приемника R и между значениями m от 1 до 2 имеет максимум, а далее сравнивается с R и затем продолжает уменьшаться, приближаясь к пределу $1/f$ по мере своего возрастания. В этом режиме для увеличения глубины резкости по толщине объекта необходимо минимизировать расстояние объект-детектор и максимизировать фокусное расстояние.

При микрофокусной рентгенографии выполняется условие $fR < 1$ и для нее всегда $R_a > R$. По мере возрастания R_a превосходит R в $1/fR$ раз. Например,

при $fR = 0,25$ разрешение аппарата будет в 4 раза больше разрешения приемника.

Наиболее равномерное разрешение по толщине объекта получается при $fR = 1$. В этом случае максимальное разрешение равно $1,41R$ при увеличении 2, а глубина резкости сохраняется по всей глубине просвечиваемого объекта. Это соответствует $f \approx 0,3$ при $R = 3,5$ пер/мм.

Так, уже при фокусном пятне трубки $f \approx 0,1$ мм для аппарата с разрешением приемника $R = 3,5$ пер/мм можно получить разрешение аппарата, сравнимое с разрешением лучших рентгенографических комплектов (около 11 пер/мм).

Выводы

1. В «пленочной» рентгенографии на трубках с $f > 0,6$ мм для обеспечения $R_a \geq R = 5 \div 10$ пер/мм глубина резкости недостаточна. Поэтому применительно к «толстым» объектам ($z > 20$ см) необходимо проводить исследования при максимально возможном приближении пациента к входной плоскости детектора и максимально возможных фокусных расстояниях.

2. В целях обеспечения равномерного разрешения по всей глубине исследуемого объекта разрешающая способность цифровых приемников снижена приблизительно в 2 раза по сравнению с разрешающей способностью рентгенографических комплектов. Увеличение размера пиксела повышает чувствительность рентгеновского аппарата и увеличивает фил-фактор.

3. В микрофокусной рентгенографии ($f \leq 0,1$ мм) глубина резкости не ограничена. Поэтому геометрия съемки подчинена задаче получения «сверхразрешения» ($R_a \geq R$) и увеличения чувствительности рентгеновских аппаратов.

4. Оснащение цифровых рентгенодиагностических комплексов микрофокусными излучателями для прицельных снимков с увеличением изображения области интереса повысит их диагностические возможности по распознаванию мелких структур.

Литература

1. Игнатьев Н. К. Дискретизация и ее приложения. М.: Связь, 1980. 267 с.
2. Блинов Н. Н., Мазуров А. И. Разрешающая способность систем воспроизведения рентгеновских изображений // Медицинская техника. 2000. № 5. С. 12–15.