

## АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ ПЕРЕД ПЛЕНОЧНЫМИ

В течение XX столетия рентгенографический комплект (экран - пленка) был основным приемником в рентгеновских аппаратах, так как по качеству изображения комплекту не было альтернативы. Однако начиная с 80-х годов пленке начали искать замену по экономическим причинам. Дело в том, что рентгеновская пленка — одноразовый приемник с большим содержанием серебра. Расход серебра в зависимости от типа пленки составляет 5—10 г/м<sup>2</sup>. Только в лечебной сети России ежегодно производят свыше 200 млн снимков различных форматов, что в пересчете на расход серебра составляет не менее 40 т. В связи с истощением мировых запасов серебра стоимость рентгеновской пленки неуклонно растет. Поиски замены пленки привели к разработке цифровых приемников различных классов [7], которые интенсивно внедряются в рентгеновские аппараты.

К настоящему времени выявлен целый ряд неоспоримых преимуществ цифровых приемников, которые описаны в многочисленных публикациях [1, 4, 5, 7]. Но в литературе отсутствует систематизированная количественная оценка этих преимуществ. Не раскрыта также главная причина эффективности цифровых приемников. Цель данной статьи заключается в устранении этого пробела.

Уникальность пленки как приемника изображений хорошо представлена А. Роузом [9], К. В. Вендровским и А. И. Вейцманом [3]. По их мнению, если бы сейчас пленки не существовало и была бы поставлена задача создать материал (приемник изображений) со следующими свойствами:

- на каждом квадратном миллиметре приемника должно быть около 1 млн световоспринимающих элементов;
- каждый элемент должен реагировать всего лишь на несколько поглощенных фотонов независимо и одновременно со всеми остальными элементами;
- коэффициент усиления сигнала в каждом элементе должен быть около  $10^9$ ;
- зарегистрированное изображение должно сохраняться в течение нескольких месяцев не визуализированным или визуализироваться через короткий промежуток времени после экспонирования;
- визуализированное изображение должно храниться долгие годы;

то, вероятно, ученые сочли бы такую задачу фантастически сложной. По описанным свойствам нетрудно заметить, что в таком фотоприемнике объединены процессы детектирования, обработки, визуализации и хранения.

Сравнительный анализ пленки и цифрового приемника показал, что главное преимущество цифровой рентгенографии в том, что в ней функция детектирования изображения, его обработки, визуализации и хранения выполняются разными устройствами, что позволяет их оптимизировать независимо друг от друга. С появлением цифровых приемников сочетание процессов детектирования, обработки, визуализации и хранения в одном носителе информации, каковым является пленка, следует рассматривать как основной недостаток пленочной технологии.

Рассмотрим все функции цифрового приемника в перечисленной выше последовательности.

**Детектирование изображения.** Выделение процесса детектирования в самостоятельный функциональный узел породило целую гамму детекторов рентгеновских изображений с параметрами и характеристиками, специализированными под разные разделы рентгенологии. Большинство параметров и характеристик цифровых детекторов

намного превышает параметры и характеристики рентгенографического комплекта.

Рентгенографический комплект принципиально не может достичь чувствительности, близкой к чувствительности идеальной системы, т. е. квантовой эффективности, равной единице [10]. Это хорошо видно из соотношения для дисперсии числа проявленных зерен серебра рентгеновской пленки:

$$D(\mu_3) = \frac{N_{\alpha_3}}{\alpha_{\alpha_1} \cdot \mu_0} + N_{\alpha_3} + N_B, \quad (1)$$

где  $D(\mu_3)$  — дисперсия проявленных зерен;  $N$  — число зерен бромистого серебра, содержащихся в  $1 \text{ мм}^2$  пленки;  $\alpha_{\alpha_1}$  — коэффициент поглощения рентгеновских лучей экранами рентгенографического комплекта;  $\mu_0$  — число рентгеновских квант, падающих на  $1 \text{ мм}^2$  экрана;  $\alpha_3$  — коэффициент, показывающий, какая часть зерен от общего числа  $N$  превратится при проявлении в серебро при экспозиции  $\mu_0$ ;  $N_B$  — число зерен вуали в  $1 \text{ мм}^2$ .

При низких дозах чувствительность ограничивает шум вуали, который принципиально неустраним (слагаемое 3 соотношения (1)). При больших дозах, соответствующих концу характеристической кривой, шум определяется главным образом шумом проявленных зерен (второе слагаемое) и имеет ту же природу, что и шум вуали. И только в середине на линейном участке характеристической кривой преобразованный шум входного рентгеновского изображения (слагаемое 1) превосходит суммарный шум зернистости и вуали. Здесь квантовая эффективность максимальная и близка к 0,2, а к концам характеристической кривой падает, приближаясь к 0. Таким образом, квантовая эффективность рентгенографического комплекта в 5 раз меньше по сравнению с идеальной системой в узком динамическом диапазоне экспозиций. Ограничение квантовой эффективности рентгенографических комплектов на уровне, близком к 0,2, является принципиальным, так как связано с физикой формирования скрытого изображения в пленке. В цифровых приемниках такое ограничение отсутствует. В существующих цифровых приемниках некоторых классов достигнутая квантовая эффективность составляет 0,65 [7].

Диапазон входных сигналов (динамический диапазон) рентгенографического комплекта для рабочего участка характеристической кривой близок к 30. Это следует из соотношения:

$$D = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{мин}}} = \gamma \sqrt{10^{(D_{\text{макс}} - D_B)}}, \quad (2)$$

где  $D$  — динамический диапазон;  $E_{\text{макс}}$ ,  $E_{\text{мин}}$  — максимальная и минимальная экспозиции соответственно;  $\gamma$  — усредненный градиент (коэффициент контрастности) пленки;  $D_{\text{макс}}$  — максимальная плотность пленки;  $D_B$  — плотность вуали.

Если средний коэффициент контрастности принять равным 2,  $D_{\text{макс}} = 3,2$ , а  $D_B = 0,2$ , то в соответствии с (2) динамический диапазон  $D$  будет равен 31,6. Для  $\gamma > 2$  динамический диапазон будет еще меньше.

Следствием узкого динамического диапазона по дозе пленочных приемников является высокий процент брака (до 15%) из-за переэкспонирования или недоэкспонирования пленки даже лаборантами средней квалификации. Вторым следствием узкого динамического диапазона пленки является необходимость поддержания на рентгенографическом комплекте строго определенной дозы в соответствии с его чувствительностью. Поэтому при использовании раstra, отсеивающего вторичное излучение, приходится увеличивать дозу на пациенте обратно пропорционально прозрачности раstra для общего потока рентгеновского излучения, т. е. в  $a$  раз:

$$a = \frac{1 + \delta}{T_p \left( 1 + \frac{\delta}{\Sigma} \right)}, \quad (3)$$

где  $\delta$  — отношение вторичного излучения к первичному;  $\Sigma$  — избирательность раstra;  $T_p$  — прозрачность раstra для первичного пучка.

В цифровых аппаратах, у которых собственными шумами приемника можно пренебречь, при установке раstra доза может быть уменьшена в  $v$  раз при условии сохранения контрастной чувствительности:

$$v = T_p \frac{1 + \delta}{1 + \frac{\delta}{\Sigma}}. \quad (4)$$

Например, для раstra с  $T_p = 0,59$ ,  $T_s = 0,07$  (прозрачность для вторичного излучения),  $\delta = 4,8$ ;  $\Sigma = T_p/T_s = 8,65$ ;  $a = 6,3$ ;  $v = 2,2$ .

Если контраст входного рентгеновского изображения не укладывается в динамический диапазон пленки, то для прозрачных участков объекта и участков с высоким поглощением необходимо делать дополнительные снимки. В цифровом приемнике, динамический диапазон которого в несколько раз больше, всю информацию о плотностях исследуемой области тела пациента можно извлечь из одного снимка. В этих случаях один цифровой снимок заменяет до 3 пленочных.

Говоря о недостатках цифровых приемников, прежде всего, указывают на более высокую разрешающую способность рентгенографических комплектов, которая находится в пределах от 5 до 10 мм<sup>-1</sup> [6]. Сама пленка практически не имеет спада контрастно-частотной характеристики до 20 мм<sup>-1</sup>, а разрешение рентгенографических комплектов определяется типом используемых усиливающих экранов. Если же оценивать разрешающую способность не рентгенографического комплекта, а рентгеновского аппарата в целом с учетом увеличения объекта, то она, как правило, в аппаратах для общей рентгенологии не превышает 3,5 мм<sup>-1</sup>, что связано с геометрией съемки и подвижностью исследуемых органов. Для цифровых аппаратов такое разрешение не является непреодолимым барьером [2]. Уже известны цифровые приемники с разрешением 5 мм<sup>-1</sup> и более [7]. Отметим, что в аппаратах для общей рентгенологии разрешающая способность аппарата в 3,5 мм<sup>-1</sup> считается достаточной и ее увеличение не практикуется, так как минимальная доза, необходимая для получения изображения малоразмерного объекта, обратно пропорциональна четвертой степени размера этого объекта [5].

Таким образом, детектор цифрового аппарата, как правило, имеет более высокую чувствительность и динамический диапазон при практически одинаковых разрешающих способностях.

**Обработка изображения в видеопроцессоре.** Если в пленочной рентгенографии обработка связана с фотохимическим проявлением скрытого изображения и ее возможности по изменению параметров изображения весьма ограничены, то к оцифрованному рентгеновскому изображению в видеопроцессоре может быть в принципе применен весь спектр наработанных цифровых обработок, которые наиболее полно изложены в монографиях [8, 11]. Прежде чем рекомендовать тот или иной алгоритм обработки изображения к использованию в практике, отметим, что он требует тщательной проверки на предмет увеличения точности диагностического исследования на стадии медицинских испытаний рентгеновских аппаратов. В ЗАО «НИПК «Электрон» проверены и внедрены разработанные цифровые аппараты ФЦ-01-«Электрон», АРЦ-01-«ОКО», КРТ-«Электрон», с помощью которых возможны коррекция неравномерности сигнала и фона по полю изображения, коррекция геометрических искажений, подавление шумов, контрастирование, масштабирование. Особенно полезной цифровая обработка оказывается при согласовании параметров изображения на мониторе со свойствами зрительного анализатора рентгенолога по яркости, контрасту, детальности и т. д. В этих случаях рентгенологу представляется возможность самому выделить зону интереса на изображении и осуществить над изображением ряд манипуляций: увеличить или уменьшить, использовать лупу контраста, изменить гистограмму распределения яркостей

и др. Возможности цифровых обработок рентгеновских изображений не только до конца не исследованы, но даже не полностью осознаны.

**Визуализация на мониторе.** Изображение на мониторе должно быть представлено так, чтобы зрительный анализатор мог извлечь всю содержащуюся в нем информацию. Выясним, какой должна быть минимальная яркость изображения в белом, чтобы она была согласована с динамическим диапазоном яркостей, воспринимаемых зрением. Из физиологии зрения известно, что все детали, яркости которых на 1,5 логарифмической единицы ниже яркости адаптации, воспринимаются как абсолютно черные, а детали, яркости которых на 1,5 логарифмической единицы выше яркости адаптации, воспринимаются как абсолютно белые, т. е.

$$\log \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}} = \log \frac{B_{\text{ад}}}{B_{\text{мин}}} = 1,5 \text{ или } \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}} = 1024.$$

Следовательно, контраст изображения на мониторе, согласованный со зрением, должен быть равен  $B_{\text{макс}}/B_{\text{мин}} = 1024$ .

Диапазон яркостей, воспринимаемых зрительным анализатором, хорошо согласован с диапазоном яркостей рентгенограмм, рассматриваемых на негатоскопе, так как разница плотностей большинства рентгенограмм равна 3. Яркость современных негатоскопов равна 2000—4000 кД/м<sup>2</sup>, а плотность большинства рентгенограмм находится в диапазоне от 0,3 до 3,3. Поэтому максимальная яркость рентгенограмм на негатоскопах составляет 1000—2000 кД/м<sup>2</sup>. Современные мониторы не обеспечивают таких яркостей. В этом усматривается одна из причин, по которой многие рентгенологи по-прежнему предпочитают ставить диагноз по рентгенограмме на пленке. В связи с этим современные цифровые аппараты должны иметь цифровой выход на устройство получения твердых копий на пленке.

Темпы развития плоских жидкокристаллических и плазменных мониторов позволяют надеяться, что проблема яркости изображения на мониторах в ближайшее время будет решена. Уже имеются промышленные образцы плоских мониторов с яркостью 800 кД/м<sup>2</sup>.

Часто ухудшение восприятия информации с экрана монитора связано с неправильным выбором освещения помещения, в котором установлен монитор. Известно, что глаз адаптируется к средней яркости помещения, поэтому попытка обеспечить хорошее восприятие за счет высокой яркости экрана монитора не приведет к желаемым результатам, если окружающий фон будет темным или очень светлым. Необходимо стремиться к тому, чтобы яркость окружающего фона и средняя яркость экрана монитора были приблизительно одинаковыми. Чтобы удовлетворить этому условию, должны быть предусмотрены оперативная регулировка яркости на экранах мониторов и соответствующее средней яркости монитора освещение помещения. Для согласования контраста интенсивностей рентгеновского изображения с динамическим диапазоном яркостей монитора должна быть предусмотрена оперативная регулировка контраста изображения.

Если рентгенолога интересует информация только в узком диапазоне яркостей изображения, применяют метод амплитудных разрезов [11]. Этот метод, который называется также режимом окна или амплитудной лупы, заключается в том, что на весь диапазон яркостей растягивается только выбранный участок видеосигнала. Изображение за пределами выбранного участка амплитуд видеосигнала не воспроизводится. Перемещая участок по диапазону значений видеосигнала, можно последовательно просмотреть все изображение. Амплитудная лупа позволяет исключить влияние на восприятие малоконтрастных деталей контрастной чувствительности зрительного анализатора. Их восприятие будет ограничиваться только шумами изображения. Часто амплитудную лупу используют только в зоне интереса, которую ограничивают рамкой, сохраняя за пределами этой рамки исходное изображение. Такой метод более эффективен, так как

сохранение изображения по всему рабочему полю позволяет рентгенологу сопоставлять зону интереса с другими участками рентгенограммы.

Чтобы зрительный анализатор рентгенолога не ограничивал восприятие мелких деталей изображения, его пространственная контрастно-частотная характеристика (КЧХ) должна быть согласована с пространственными частотами изображения, воспроизводимого на мониторе. Такое согласование обеспечивается масштабированием изображения на экране монитора. При оптимальном увеличении пространственные частоты изображения, представляющие для рентгенолога наибольший интерес, должны приходиться на максимум КЧХ зрения. Например, если рентгенолога интересует костная структура, пространственный спектр которой на мониторе группируется около частоты  $3 \text{ мм}^{-1}$ , а минимум КЧХ зрения при расстоянии рассматривания 25 см близок к  $1,5 \text{ мм}^{-1}$ , то целесообразно применить увеличение изображения в 2 раза. Излишнее или недостаточное увеличение может привести к существенному ухудшению восприятия мелкой структуры изображения. В практических конструкциях цифровых рентгеновских аппаратов важно обеспечить рентгенологу либо оптимальный набор увеличений, либо право выбора увеличения. Практика эксплуатации цифровых рентгеновских аппаратов показала, что рентгенологами используются увеличения до 4 раз. Большие увеличения приводят не к улучшению, а к ухудшению восприятия изображения из-за видимости дискретной структуры изображения и нерезкости границ.

При анализе рентгеновских изображений в ряде случаев возникает необходимость увеличить диапазон изменения яркости на мониторе для темных деталей за счет уменьшения его для светлых деталей. Наиболее просто это реализуется изменением полярности сигнала изображения (позитив—негатив). Кроме того, рентгенологи, которые чаще работают на усилителях рентгеновского изображения, где исходное изображение позитивное, предпочитают работать с позитивом, а рентгенологи, анализирующие рентгенограммы, — с негативом, поэтому в автоматизированных рабочих местах рентгенолога предусматривается возможность изменения позитивного изображения на негативное.

Изложенное выше показывает, что визуализация рентгенограммы на мониторе имеет широкие возможности по оптимизации ее параметров, что в будущем заставит рентгенологов отказаться от твердой копии и ее анализа на негатоскопе.

**Хранение.** Внедрение в медицинскую практику цифровых аппаратов стимулировало интенсивную разработку цифровых систем передачи и хранения медицинских изображений (PACS), а также развитие телерадиологии [4, 5, 7]. Это направление исследований и разработок переживает настоящий бум, так как позволяет поднять на более высокий уровень всю организационную структуру лучевой диагностики.

В заключение еще раз подчеркнем, что широко развитая пленочная технология, сочетающая в одном носителе функции детектирования, обработки, визуализации и хранения изображения и сыгравшая неосценимую роль в развитии лучевой диагностики XX века, в настоящее время является тормозом на пути ее развития.

## Литература

1. Блинов Н. Н., Мазуров А. И. // Мед. техника. — 1999. — № 5. - С. 3-6.
2. Блинов Н. Н., Мазуров А. И. // Мед. техника. — 2000. — № 5. - С. 12-15.
3. Вендровский К. В., Вейцман А. И. Фотографическая структурометрия. — М., 1982.
4. Зеликман М. И. Теория, исследование и разработка методов и аппаратно-программных средств медицинской цифровой рентгенографии: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2001.
5. Медицинская рентгенология: технические аспекты, клинические материалы, радиационная безопасность / Под ред. Р. В. Ставицкого. — М., 2003.
6. Общее руководство по радиологии. Юбилейная книга NICER. - Нью Йорк, 1995.
7. Основы рентгенодиагностической техники / Под ред. Н. Н. Блинова. - М., 2002.

8. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. — М., 1982.
9. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение. — М., 1977.
10. Физика визуализации изображений в медицине. Т. 1 / Под ред. С. Уэбба. — М., 1991.
11. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М., 1979.

#### ANALYSIS OF THE ADVANTAGES OF DIGITAL X-RAY APPARATUSES OVER FILM X-RAY APPARATUSES

M. B. Elinson

Summary. A comparative review of characteristics of film and digital detectors of X-ray apparatuses. Advantages of digital X-ray apparatuses over film X-ray apparatuses are discussed.

// Медицинская техника. – 2005. - №5. – С. 37 - 39.