

УДК 616-073.759: 616.12-07

Н.М. Федотов, А.И. Оферкин, А.И. Буллер, Д.Ю. Ларионов, А.Ю. Разумов

Разработка ротационного рентгеновского аппарата с кольцевым штативом для оперативного создания 3D-изображений сердца

Представлена разработка специализированного рентгеноскопического комплекса с кольцевым штативом для получения 3D-изображений структур сердца, предназначенного для выполнения операций по лечению сложных форм аритмий.

Ключевые слова: рентгеновский аппарат, ротация, кольцевой штатив.

Расширение и усложнение технологии лечения заболеваний сердца и сосудов методами катетерной аблации привели к тому, что использование общепринятого метода рентгеноскопической визуализации в ходе данных вмешательств недостаточно для детализации внутрисердечных структур, а также неизбежно ведет к опасному повышению дозы облучения. Трехмерная ротационная рентгенография является одним из современных перспективных направлений для снижения риска и повышения эффективности в рентгенохирургии катетерной аблации аритмий. Этот метод заключается в виртуальном построении объемных моделей сосудов и камер сердца на основе стандартных серий рентгеновских снимков, полученных во время вращения С-дуги рентгеновского аппарата. Возможность использования метода ротационной рентгенографии для получения информации для синтеза трехмерных рентгеноконтрастных объектов в хирургии нарушений ритма сердца находится на этапе исследований, хотя родственная методика уже широко применяется в ангиографии для исследования состояния сосудистой системы сердца. Дальнейшее развитие этого направления в хирургии нарушений ритма сердца сдерживается отсутствием специализированных рентгеновских аппаратов. Такой рентгеновский аппарат в операционной комнате должен функционально соответствовать аппаратам типа РТС-612 («Электрон», Санкт-Петербург) с С-образными штативами и в то же время быть способным обеспечить сканирование пациента с высокой частотой в режиме высокой интенсивности для получения серии снимков ротационным способом, обладая при этом высокой жесткостью конструкции, аналогичной компьютерным томографам.

Целью данной работы является разработка специализированного рентгеноскопического комплекса с кольцевым штативом для оперативного получения 3D-изображений структур сердца и предназначенного для выполнения операций по лечению сложных форм нарушений ритма сердца.

Для реализации поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

Разработать конструкцию рентгеновского аппарата, компактного и легкого, обеспечивающего необходимую жесткость в режиме ротации, а также свободный доступ хирурга к пациенту.

Определить минимально допустимые параметры малодозного импульсного режима, для обеспечения приемлемых динамических характеристик и контрастной чувствительности для слежения за подвижными объектами.

Определить характеристики по частоте кадров, угловой скорости вращения, длительности импульсов и мощности излучения режима высокой интенсивности для получения последовательных контрастированных рентгеновских изображений в режиме ротации с последующим конструированием трехмерной модели сердца на основе этих данных.

Разработка кольцевого штатива рентгеновского аппарата

В процессе разработки ротационного рентгеновского аппарата была предложена конструкция с кольцевым штативом. Благодаря новому конструктивному решению с использованием кольцевого штатива в основе ротационной рентгеновской установки (рис. 1) по типу конструкций спиральных томографов, например Aquilion 64 (Toshiba, Япония) [1], было получено явное преимущество перед ближайшими аналогами, такими как Artis zee Multi-purpose system, (Siemens, Германия) [2], POWERMOBIL (Siemens, Германия) [3], использующими С-образные штативы с осесимметричным получением проекций объекта. Движение излучателя относительно УРИ (усилитель рентгеновского изображения) в ротационном рентгеновском аппарате реализовано так же, как в компьютерном томографе, по окружности, но при этом конструкция кольцевого штатива менее массивна и значи-

тельно тоньше, блоки УРИ и излучателя вынесены за плоскость окружности. Такая конструкция обеспечивает точное позиционирование относительно центра оси вращения, свободный доступ оперирующего хирурга к пациенту и необходимую жесткость для исключения влияния вибраций УРИ и излучателя на изображение. Скорость углового вращения при сканировании (для получения 3D изображений) достигает $30^\circ/\text{с}$. Для получения информации о соответствии проекции снимка с действительным положением отдела сердца в пространстве в ротационной рентгеновском аппарате предусмотрено устройство контроля за положением оси пучка излучения.

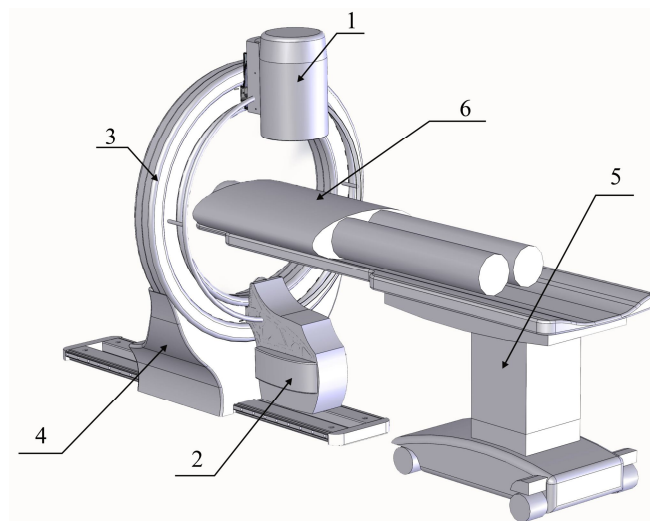


Рис. 1. Ротационный рентгеновский аппарат с кольцевым штативом: 1 – УРИ; 2 – излучатель; 3 – кольцевой штатив; 4 – основание на линейных направляющих; 5 – операционный стол с рентгенопрозрачной декой; 6 – пациент

Определение параметров малодозного импульсного режима

Для получения оптимальных параметров малодозного режима просвечивания (и визуализации инструмента внутри камер сердца) была проведена серия экспериментов с целью установления порогового значения контрастной чувствительности, при котором хирург может без затруднений следить за движением инструмента внутри сердца без увеличения дозы на изображение. Эксперименты выполнены на установке, изготовленной авторами [4]. Причиной таких условий являются динамика сердца и его сравнительно быстрые сокращения. Время импульса генератора при слежении за катетерами внутри сердца рассчитывается из формулы (1) динамической нерезкости H_d [5] при экспериментально определенном значении скорости движения катетера внутри сердца в камерах предсердий, равном 16 мм/с. И поскольку глаза наблюдателя замечают нерезкость, величина которой превышает 0,25 мм, при прямолинейном движении исследуемого объекта во время съемки величина динамической нерезкости H_d определяется как произведение скорости движения этого объекта v на продолжительность выдержки t [5]:

$$H_d = v \cdot t, \quad (1)$$

где v – скорость катетера; t – время импульса генератора.

Время импульса генератора должно быть равно 15 мс.

Измерения проводились при следующих условиях: фантом взрослого среднестатистического человека – 25 мм алюминия; диаметр входного поля УРИ 230 мм; расстояние фокус-трубки – входная плоскость усилителя изображения 1000 мм; одинаковая для всех измерений чувствительность ПЗС-камеры (ПЗС – прибор с зарядовой связью); доза на кадр 20 нГр.

Как видно из таблицы, пространственное разрешение при изменении дозы на изображение менялось незначительно, и поэтому его можно исключить как критерий отбора.

Характеристики малодозных режимов

Анодное напряжение, кВ	Анодный ток, мА	Время импульса генератора, мс	Пространственное разрешение, лин./мм	Контрастная чувствительность, %	Проекция съемки
70	1	15	1,8	3	Прямая
70	1,5	15	2,0	2	Прямая
70	2	15	2,0	2	Прямая
70	2,5	15	2,0	2	Прямая
70	3	15	2,0	1,5	Прямая
100	2	15	2,0	3	Боковая
100	2,5	15	2,0	2	Боковая
100	3	15	2,0	2	Боковая
100	3,5	15	2,0	2	Боковая

Наиболее оптимальные параметры малодозного режима просвечивания для прямой проекции достигаются при анодном напряжении 70 кВ, анодном токе рентгеновской трубки 1,5 мА, времени импульса генератора с синхронизированным захватом изображения ПЗС-камеры 15 мс. Дальнейшее увеличение анодного тока привело к незначительному увеличению контрастной чувствительности, что позволило судить об отсутствии необходимости неоправданного повышения дозы излучения.

Для боковой проекции: анодное напряжение 100 кВ, анодный ток рентгеновской трубки 2,5 мА, время импульса генератора с синхронизированным захватом изображения ПЗС-камеры 15 мс.

Определение параметров в режиме сканирования

Режим сканирования ротационного рентгеновского аппарата предназначен для проведения ротационной контрастной рентгенографии с последующей обработкой для получения трехмерного изображения и комплексированием его с рентгеноскопией реального времени. Уникальность такого подхода заключается в возможности построения точной модели камер сердца непосредственно в ходе хирургической операции. Следует отметить, что для трехмерной реконструкции необходимо получение изображения с высоким качеством, т.е. с минимальным уровнем шума, в отличие от малодозных режимов, когда выбирается компромиссное решение между допустимым уровнем шума в изображении и минимальной мощностью дозы.

Когда проводятся исследования коронарных сосудов сердца, исходя из формулы (1), нетрудно убедиться, что для сосудов, размер которых не превышает 1 мм, а скорость смещения доостигает 250 мм/с, значение выдержки не должно превышать 1–2 мс для сохранения параметра динамической нерезкости в пределах порогового значения 0,25 мм. Для обеспечения постоянства дозы и сохранения высокого контраста изображение в аппаратах, предназначенных для исследования коронарных сосудов, необходимо увеличивать анодный ток до 1000 мА и более.

Для выполнения задачи по реконструкции отделов сердца, обладающих меньшей относительной коронарных сосудов подвижностью ($v \approx 20$ мм/с) [6] и на несколько порядков большей размерностью (правое, левое предсердие ≈ 50 –80 мм) при сохранении постоянства значения дозы порядка 100–200 нГр/кадр, при которой обеспечивается низкий уровень шума изображения и контрастная чувствительность менее 1%, можно увеличить длительность импульса до 10 мс, и, следовательно, анодный ток составит от 150 до 300 мА. Данный режим может обеспечиваться источниками рентгеновского излучения мощностью до 30 кВт.

Программное обеспечение ротационной рентгеновской установки

Программа предназначена для создания 3D-изображений камер сердца и сосудов из последовательности рентгеновских изображений и их визуализации в ходе операции по лечению проводящих путей сердца методами катетерных аблаций, а также для фильтрации, формирования контуров, масштабирования, наложения 3D-объектов и контуров на малодозное изображение.

Для получения изображений осуществляется ротация излучающей системы рентгеновской установки на 180° в течение 5 с со скоростью съемки 25 кадров в секунду и предварительным введением рентгеноконтрастного вещества, далее к полученным изображениям применяются алгоритмы цифровой фильтрации, после чего на изображениях выделяются участки с высокой плотностью (поглощение рентгеноизлучения), затем трёхмерное изображение воссоздается по слоям с использованием алгоритма марширующих кубиков (marching cubes) [7, 8].

Программа позволяет получить трёхмерную информацию об анатомии сердца непосредственно в ходе операционного вмешательства, что повышает информативность рентгеноскопического изображения. Есть возможность импорта для интеграции с изображениями систем 3D-навигации с целью повышения точности позиционирования эндокардиальных электродов-катетеров.

В результате программной обработки полученной ротационным способом последовательности контрастированных изображений камеры сердца воссоздается трехмерная модель этой камеры с последующей визуализацией на экране монитора, с наложением трехмерной модели на малодозную флюороскопию реального времени (рис. 2) для ускорения процедуры позиционирования инструмента в камере сердца, что, в свою очередь, значительно сокращает время и поглощенную дозу излучения пациента и врачебного персонала во время хирургического вмешательства.

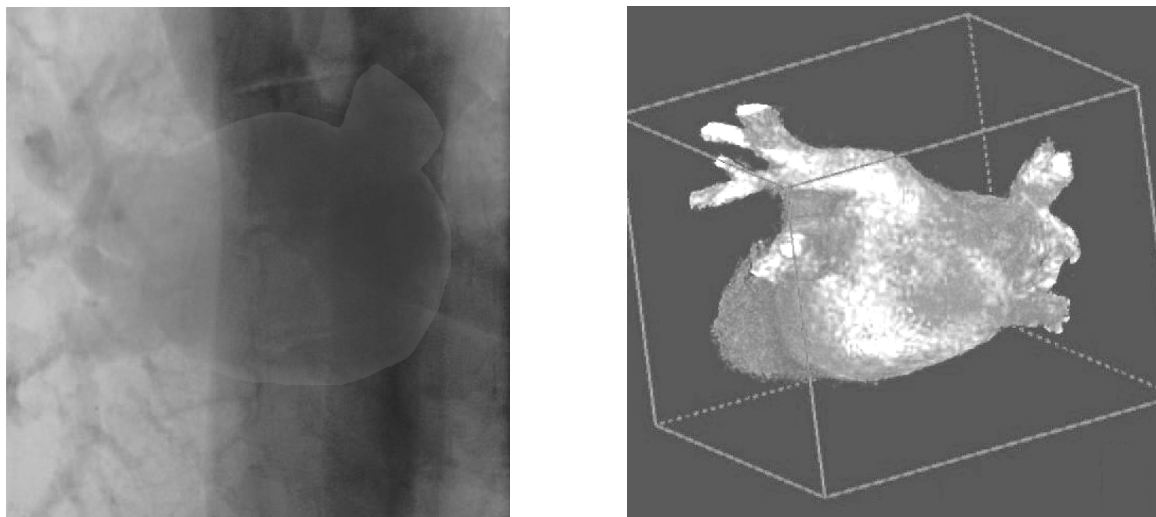


Рис. 2. Слева: пример наложения контура объекта на малодозное рентгеноскопическое изображение [7, 8]. Справа: пример 3D-модели левого предсердия, созданной из последовательности рентгеновских изображений, полученных ротационным способом. Используются материалы [9]

Выводы

Разработана оригинальная конструкция специализированного рентгеновского аппарата с кольцевым штативом, определены оптимальные параметры малодозного импульсного режима и параметры режима с высокой интенсивностью излучения с применением рентгеноконтрастных веществ для трехмерной реконструкции отделов сердца.

Отличительными особенностями аппарата являются:

- компактная и жесткая конструкция, обеспечивающая высокую скорость ротации при сканировании в режиме высокой интенсивности излучения;
- возможность конструирования трехмерных объектов камер сердца и сосудов из последовательности рентгеновских изображений при ротационном способе их получения непосредственно во время операции;
- возможность наложения 3D-объектов на рентгеновское изображение реального времени.

Литература

1. Залесский В.Н. Коронарная томографическая диагностика: новые методы визуализации в клинике. Этюды современной инструментальной диагностики. – Вып. 4 / Залесский В.Н., Дынник О.Б. – Киев: ВБО «Украинский доплеровский клуб», 2007. – 280 с.
2. Artis zee Multi-purpose system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.medical.siemens.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay~q_catalogId-e_11-a_catTree-e_100010,1007660,12751,14335-a_langId-e_11-a_productId-e_181903-a_storeId-e_10001.htm, свободный (дата обращения: 24.11.2010).
3. POWERMOBIL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ameqs.ru/info/shop/1934/>, свободный (дата обращения: 24.11.2010).
4. Мобильный рентгеновский аппарат XR-Biotok 015U [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.biotok.ru/ru/product/operating/14/>, свободный (дата обращения: 24.11.2010).
5. Соколов В.М. Выбор оптимальных физико-технических условий рентгенографии (практическое руководство для рентгенолаборантов). – Л.: Медицина, 1979. – 272 с.
6. Кишковский А.Н. Атлас укладок при рентгенологических исследованиях / А.Н. Кишковский, Л.А. Тютин, Г.Н. Есиновская. – Л.: Медицина, 1987. – 520 с.
7. Жарый С.В. Ротационная рентгенография для трёхмерной реконструкции камер сердца и сосудов / С.В. Жарый, Н.М. Федотов, А.И. Оферкин // Вестник аритмологии. – 2010. – Приложение А. Материалы конгресса с международным участием «Кардиостим-2010». – С. 186–186.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615380. – Программа управления компьютерной системой визуализации рентгенографических исследований и трехмерной реконструкции сердца / Жарый С.В., Федотов Н.М., Оферкин А.И. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 августа 2010 г.

9. Intraprocedural Imaging of Left Atrial and Pulmonary Vein Anatomy for Atrial Fibrillation / R. Chan, A. Thiagalingam, A. d'Avila et al. // Ablation Computers in Cardiology. – 2007. – Vol. 34. – P. 777–779.

Федотов Николай Михайлович

Канд. техн. наук, зав. лабораторией безопасных биомедицинских технологий ЦТБ ТУСУРа
Тел.: +7-913-829-27-53
Эл. почта: fmobile@rambler.ru

Оферкин Александр Иванович

Канд. мед. наук, ст. науч. сотрудник, руководитель отделения сердечно-сосудистой хирургии
Сибирского государственного медицинского университета
Тел.: (382-2) 52-86-27
Эл. почта: office@biotok.ru

Буллер Алексей Иванович

Аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета
Тел.: 8-952-805-96-12
Эл. почта: Bullerai@yahoo.com

Ларионов Дмитрий Юрьевич

Главный инженер ООО «Лаборатория медицинской электроники «Биоток» (г. Томск)
Тел.: (382-2) 55-59-91
Эл. почта: office@biotok.ru

Разумов Александр Юрьевич

Главный конструктор ООО «Лаборатория медицинской электроники «Биоток»
Тел.: (382-2) 55-59-91
Эл. почта: office@biotok.ru

Fedotov N.M., Oferkin A.I., Buller A.I., Larionov D.Yu., Rasumov A.Yu.

Development of rotational X-ray machine with a circular holder for rapid generation of the 3D heart images

Development of a specialized X-ray complex with a circular holder for rapid generation of 3D images of the human heart structures, which is intended for treatment of complex forms of the heart arrhythmia, is described.

Keywords: X-ray machine, rotation, circular holder.
