

УДК 616-71

Полноразмерный отечественный магнитно-резонансный томограф на сверхпроводящем магните с индукцией поля 1,5 Тл

Чехонин В.П.¹, Мажуга А.Г.², Багдинова А.Н.³, Рыбаков А.С.³, Демихов Е.И.³,
Демихов Т.Е.³, Лысенко В.В.³, Мишкинис Б.Я.⁴, Константинов М.В.³, Тарасов В.П.³,
Шумм Б.А.³, Шумм А.Б.³, Пистрак Г.М.³, Пистрак А.Г.³, Дмитриев Д.С.³

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И.Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

117997, Москва, ул. Островитянова, д. 1

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И.Менделеева».

125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук.

119991, Москва, Ленинский пр., д. 53

⁴ ООО «С.П. Гелпик».

117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 86, корп. 2

Представлен первый отечественный полноразмерный магнитно-резонансный томограф МРТ4.1 для широкого спектра применений, выполненный на базе сверхпроводящего магнита с полем 1,5 Тл. Описано программное обеспечение, позволяющее реализовывать любые последовательности изображений. Томограф и программное обеспечение имеют параметры, не уступающие западным производителям. Преимуществом МРТ является возможность изменять физические параметры магнита и свободный программный код, что представляет интерес для исследователей и продвинутых пользователей.

Ключевые слова: магнитно-резонансный томограф; магнитно-резонансная томография; МРТ; ядерный магнитный резонанс; программное обеспечение МРТ.

Для цитирования: Чехонин В.П., Мажуга А.Г., Багдинова А.Н., Рыбаков А.С., Демихов Е.И., Демихов Т.Е., Лысенко В.В., Мишкинис Б.Я., Константинов М.В., Тарасов В.П., Шумм Б.А., Шумм А.Б., Пистрак Г.М., Пистрак А.Г., Дмитриев Д.С. Полноразмерный отечественный магнитно-резонансный томограф на сверхпроводящем магните с индукцией поля 1,5 Тл.

Патогенез. 2018; 16(4): 71-80

DOI: 10.25557/2310-0435.2018.04.71-80

Для корреспонденции: Багдинова Анна Николаевна, e-mail: anna.bagdinova@gmail.com

Финансирование. Исследование не имеет спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 15.09.2018

A full-size first-in-Russia MRI high resolution complex with a 1.5 Tesla superconducting magnet

Chekhonin V.P.¹, Majouga A.G.², Bagdinova A.N.³, Rybakov A.S.³, Demikhov E.I.³,
Demikhov T.E.³, Lysenko V.V.³, Mishkinis B.Ya.⁴, Konstantinov M.V.³,
Tarasov V.P.³, Shumm B.A.³, Shumm A.B.³, Pistrak G.M.³, Pistrak A.G.³, Dmitriev D.S.³

¹ N.I. Pirogov Russian National Research Medical University,
Ostrovityanova Str. 1, Moscow 117997, Russian Federation

² D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,
Miusskaya Ploshchad 9, Moscow 125047, Russian Federation

³ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Leninskiy Prospekt 53, Moscow 119991, Russian Federation

⁴ "S.P. Helpic" Ltd,
Profsoyuznaya Str. 86, Bldg. 2, Moscow 117997, Russian Federation

The article presents a first-in-Russia MRI system for vast scope of applications based on a 1.5 Tesla superconducting magnet and describes the software capable to produce any sequence of images. The MRI and software parameters are not inferior to those provided by MRI production leaders. The advantage of this MRI system is a possibility to change magnet field parameters and the free program code, which is interesting for researchers and advanced users.

Key words: magnetic resonance tomography, magnetic resonance imaging, MRI, nuclear magnetic resonance, MRI software.

For citation: Chekhonin V.P., Majouga A.G., Bagdinova A.N., Rybakov A.S., Demikhov E.I., Demikhov T.E., Lysenko V.V., Mishkinis B.Ya., Konstantinov M.V., Tarasov V.P., Shumm B.A., Shumm A.B., Pistrak G.M., Pistrak A.G., Dmitriev D.S. [A full-size first-in-Russia MRI high resolution complex with a 1.5 Tesla superconducting magnet]. *Patogenez [Pathogenesis]*. 2018; 16(4): 71-80 (In Russian).

DOI: 10.25557/2310-0435.2018.04.71-80

For correspondence: Bagdinova Anna Nikolaevna, e-mail: anna.bagdinova@gmail.com

Funding. The study had no sponsorship.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received: 15.09.2018

Введение

Магнитно-резонансная томография представляет собой наиболее информативный метод неинвазивного исследования внутренних органов и тканей с использованием явления ядерного магнитного резонанса. Магнитно-резонансный томограф (МРТ) позволяет получать изображения внутренних органов человека в плоскостях параллельных срезах заданной толщины.

МРТ имеет значительный диапазон диагностических возможностей. Современные МРТ применяются для диагностики широкого спектра патологий организма человека, а именно:

- заболеваний головного мозга и центральной нервной системы;
- заболеваний в шейном, грудном и поясничном отделах позвоночника;
- заболеваний внутренних органов: сердечно-сосудистой системы (кардио-исследования), легких, брюшной полости, печени, почек, малого таза;
- заболеваний суставов конечностей;
- заболеваний сосудистой системы (МР-ангиография) и др.

Для обеспечения условий использования ядерного магнитного резонанса необходимо поместить исследуемый объект в сильное постоянное и однородное магнитное поле и подвергнуть воздействию дополнительного высокочастотного поля. При определенной частоте высокочастотного поля возникает явление резонанса, при котором ядра химических элементов поглощают энергию и переходят на более высокий энергетический уровень. После прекращения действия высокочастотно-

го импульса, возбужденные им ядра возвращаются в исходное состояние. Во время этого процесса, называемого релаксацией, резонировавшие ядра излучают слабые электромагнитные волны. Регистрация и компьютерная обработка этих сигналов позволяет построить срезы изображения человеческого тела в заданной плоскости. Магнитно-резонансная томография позволяет получить как анатомические, так и физико-химические характеристики тканей и четко отличить здоровые ткани от поврежденных.

В Российской академии наук (ФИАН) был разработан и изготовлен опытный образец полноразмерного магнитно-резонансного томографа (МРТ) на сверхпроводящем магните с индукцией поля 1,5 Тл. Сверхпроводящий магнит был выполнен на основе предыдущих разработок коллектива по созданию сверхпроводящих магнитов лабораторного применения с полем до 15 Тесла. [1-7]. В результате осуществления проекта в 2008-2017 годах были созданы: опытный образец магнитно-резонансного томографа на отечественном сверхпроводящем магните с полем 1,5 Тесла; программное обеспечение; периферийные устройства, необходимые для получения изображения и размещения пациента. Результатом работы является полный комплекс для МРТ диагностики, способный получать высококачественные изображения. Целью настоящей публикации является описание созданного МРТ (рис. 1).

Структура МРТ комплекса.

Магнитно-резонансный томографический комплекс МРТ4.1 включает в себя:

- магнитную систему замкнутого цикла со сверхпроводящим магнитом;
- градиентно-корректирующий модуль с системой пассивного шиммирования;
- комплект радиочастотных (РЧ) катушек;
- стойку обеспечения с радиочастотным усилителем мощности и блоком усилителей градиентов;
- цифровой спектрометр с возможностью модуляции по частоте, фазе и амплитуде;
- основной компьютер на базе персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (ПО);
- радиочастотную клетку-экран (клетку Фарадея), служащую для подавления эфирных радиопомех;
- стол для пациента;
- рабочее место врача.

Схема МРТ комплекса изображена на рис. 2.

Магнитная система томографа предназначена для создания высокооднородного постоянного магнитного поля в зоне исследования, представляющей собой сферу диаметром 160 мм. Система состоит из следующих частей:



Рис. 1. Первый отечественный полноразмерный магнитно-резонансный томограф на базе сверхпроводящего магнита с полем 1,5 Тл МРТ 4.1 (внешний вид).



Рис. 2. Схематическое изображение томографического комплекса.

- сверхпроводящего магнита туннельного типа с восемью встроенными сверхпроводящими катушками, погруженными в жидкий гелий;

- компактного двухступенчатого гелиевого криостата «нулевого парения» с компрессором обеспечивающего долговременную работу без дозаправки жидким гелием;

- градиентного модуля, состоящего из трех градиентных катушек, предназначенного для создания градиентных магнитных полей в трех ортогональных направлениях X, Y, Z и смонтированного в цилиндрической полости магнита;

- системы пассивного шиммирования, предназначенной для тонкой настройки однородности основного магнитного поля и конструктивно выполненной в составе градиентного модуля.

Управляющая электроника (спектрометр) предназначена для выдачи управляющих сигналов и команд в системе томографа, а также приема и обработки сигналов, поступающих от приемной радиочастотной катушки.

Спектрометр состоит из трех плат, размещаемых в слотах системного блока управляющего персонального компьютера (ПК):

- платы сигнального процессора (DSP);
- платы градиентов (ГРД);
- радиочастотной (РЧ) платы.

Передатчик расположен в силовой стойке и служит для усиления радиочастотных импульсов, поступающих с РЧ-платы спектрометра. Нагрузкой для передатчика является приемно-передающая РЧ-катушка, формирующая высокочастотное электромагнитное поле, возбуждающее спины протонов в исследуемом объекте.

Градиентные усилители также расположены в силовой стойке и служат для усиления токовых импульсов, поступающих с платы градиентов спектрометра и создания дополнительных магнитных полей, линейно изменяющихся вдоль соответствующей пространственной оси X, Y или Z.

В основном ПК реализована программа интерфейса пользователя, позволяющая регистрировать пациента, задавать режимы и параметры сканирования, запускать и останавливать процесс сканирования, реконструировать и анализировать полученные изображения.

Приемно-передающая катушка предназначена с одной стороны для создания возбуждающего высокочастотного электромагнитного поля и, с другой стороны, для регистрации ЯМР-сигнала, излучаемого объектом исследования после прекращения возбуждающего импульса. В катушке реализован электронный ключ переключения с приема на передачу и обратно.

Магнитная система с приемно-передающей катушкой располагается в экранированной радиочастотной клетке, подавляющей внешние радиопомехи, а ввод сигнальных и питающих проводов в РЧ клетку осуществляется через систему проходных фильтров.

Описание программного обеспечения

Программный комплекс управления магнитно-резонансным томографом (далее – Программа) предназначен для выполнения следующих задач в рамках МРТ-диагностики:

- загрузка данных о пациенте;

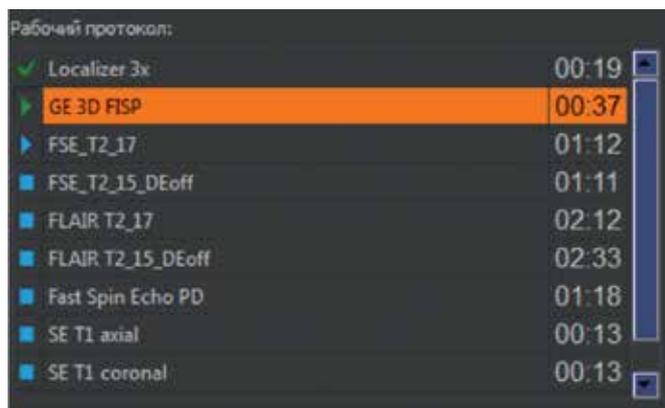


Рис. 3. Интерфейс меню рабочего протокола

- выбор необходимого протокола исследования;
- настройка параметров последовательностей сканирования и получаемых изображений;
- получение набора «прицельных» (пилотных) изображений;
- позиционирование плоскостей сканируемых изображений;
- запуск сканирования, приостановка и отмена сканирования;
- просмотр серий изображений, полученных в результате выполнения последовательностей сканирования;
- первичная обработка полученных изображений;
- сохранение результатов обследования в формате DICOM;
- редактирование и сохранение протоколов исследования;
- настройка томографа инженерным персоналом («мастер – режим»).

Начало работы

Программа предназначена для запуска в составе автоматизированного рабочего места (АРМ) врача. В данный момент поддерживаются АРМ digiraX и ПО МРТ СамГМУ.

После вызова программы из АРМ врача, открывается главное окно Программы, содержащее следующие элементы интерфейса:

- 1 – область данных пациента;
- 2 – область просмотра изображений;
- 3 – панель управления;
- 4 – область выбора протоколов;
- 5 – список доступных последовательностей;
- 6 – кнопки редактирования рабочего протокола;
- 7 – область управления рабочим протоколом исследования;
- 8 – список параметров активной последовательности;
- 9 – строка состояния и индикатор хода выполнения сканирования;
- 10 – кнопки запуска/остановки сканирования и выхода из программы.

В области данных пациента отображаются сведения о пациенте, переданные из АРМ врача:

- ФИО пациента;
- идентификационный номер;
- пол пациента;
- возраст пациента;
- область обследования;
- положение пациента в томографе.

Поскольку данные вводятся в АРМ врача, то в Программе они выводятся только для просмотра, без возможности редактирования.

Выбор протокола и его настройка

При загрузке программы по умолчанию выбирается протокол для исследуемой части тела (настраивается при установке программы). При этом в области выбора протоколов (рис. 3) выводятся все доступные для данной части тела протоколы.

Пользователь может добавлять и удалять отдельные шаги в рабочем протоколе.

Рабочий протокол состоит из строк с шагами (последовательностями), и отображает:

- статус шага;
- название последовательности;
- приблизительное время выполнения последовательности (мин : с).

Последовательности рабочего протокола могут принимать следующие статусы:

- – последовательность в процессе сканирования;
- ▶ – последовательность будет запущена автоматически;
- – последовательность будет запущена автоматически;
- – последовательность будет запущена автоматически.

Для настройки порядка выполнения протокола пользователь с помощью нажатия на значок статуса в нужной строке может задавать, какие шаги могут быть выполнены автоматически, без дополнительной остановки, а для каких следует приостановить выполнение протокола (подробнее см. раздел «Сканирование»).

Настройка параметров последовательностей

При выделении шага в рабочем протоколе, в области справа отображаются параметры для соответствующей последовательности (рис. 4).

Редактирование значений параметров возможно с помощью ввода значений с клавиатуры или изменения мышью/клавиатурой с помощью стандартных элементов управления. Параметры, доступные для редактирования:

- число накоплений;
- ориентация слоев (аксиальная, фронтальная, сагитальная);
- FOV - поле обзора (в мм);
- число слоев (партиций для 3D);
- толщина слоя (в мм);
- расстояние между центрами соседних слоев (в мм);

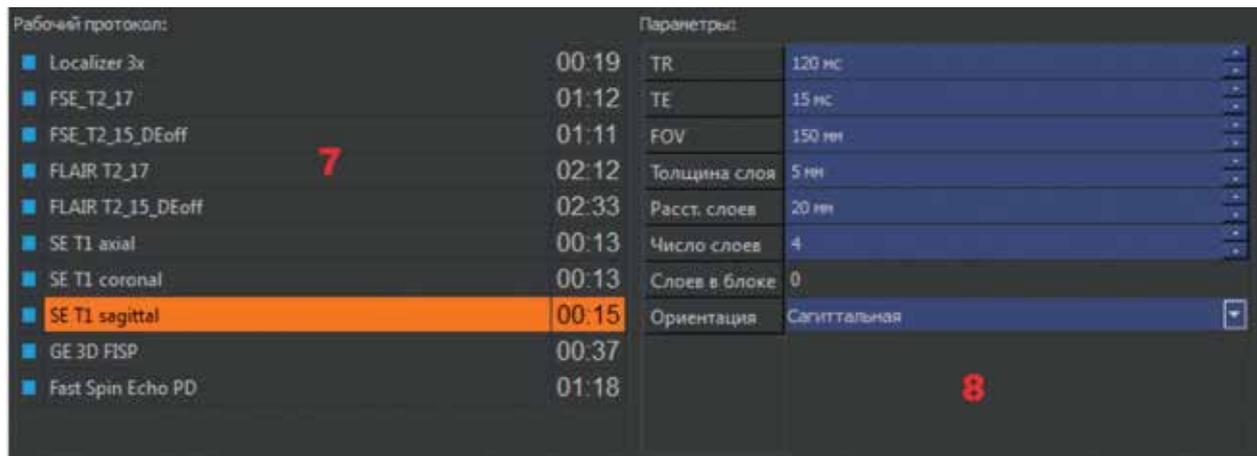


Рис. 4. Интерфейса настройки параметров последовательности. Слева – выбор рабочего протокола. Справа – изменение параметров последовательностей.

– TI – время инверсии (мс) для IR последовательностей;

– TR – время повторения (мс);

– TE – время эха (мс).

Параметры могут разделяться на несколько типов, по способу управления их значениями:

1 – Ручным вводом, можно управлять:

– мышью: с помощью кнопок прокрутки или с помощью колесика;

– клавиатурой: стрелками вверх-вниз (изменяется на 1 пункт);

– клавиатурой: клавишами Page Up / Page Down (изменяется на 10 пунктов);

– вводом значения вручную.

2 – Только для просмотра (серый фон);

3 – Выбор из списка;

4 – Флажок.

Получение прицельных изображений

Первым в протоколе выполняется сканирование прицельных (пилотных) изображений (Localizer, Pilot и т.п.). В результате получается 3 или 9 изображений в трех стандартных проекциях. Пилотная последовательность обычно не требует настройки параметров.

После получения прицельных изображений, протокол переходит на следующий шаг, в области изображений становятся доступными инструменты управления прицеливанием.

Прицеливание. Пунктирными линиями на изображении показываются линии пересечения слоев прицеливаемой последовательности и плоскости пилотного изображения. Первый по счету слой выделен цветом. С помощью мыши можно перемещать слои (используется маркер в центре слоев) и изменять их наклон (используются маркеры по краям слоев). В случае если слои прицеливаемой последовательности расположены параллельно плоскости пилотного изображения (имеют одинаковую ориентацию), отображается прямоугольник области отображения (FOV). С помощью мыши и мар-

кера в центре прямоугольника пользователь может перемещать FOV в необходимую область.

В случае необходимости сканирования в режиме множественных наклонов Multi Angle Oblique (MAO), когда требуется отдельное позиционирование каждого слоя последовательности (например, при исследованиях позвоночника), на панели управления включается режим MAO, и элементы управления прицеливанием изменяются следующим образом (рис. 5):

Теперь пользователь может перемещать каждый слой по отдельности, а также индивидуально изменять угол наклона каждого слоя.

Сканирование

После прицеливания и настройки параметров последовательности, пользователь запускает сканирование (по нажатию кнопки Сканирование). Интерфейс программы представлен на рис. 6. Ход процесса сканирова-



Рис. 5. Позиционирование слоев в режиме множественных наклонов Multi Angle Oblique (MAO).

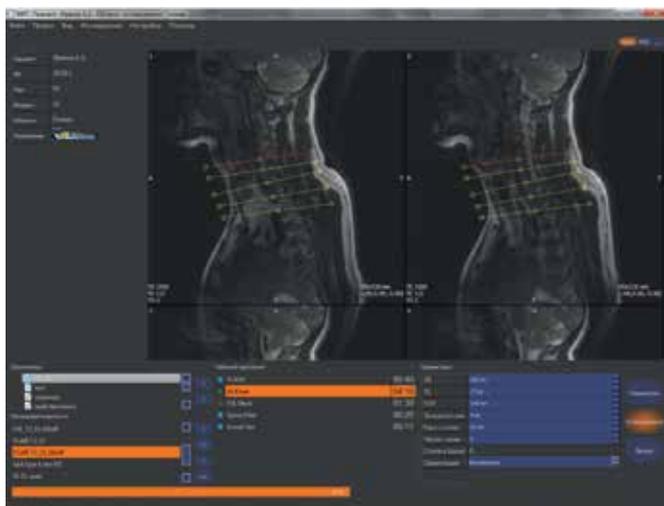


Рис. 6. Интерфейс программы во время процедуры сканирования

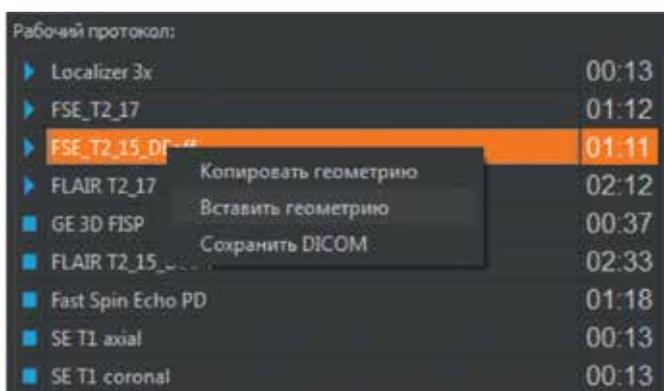


Рис. 7. Меню копирования и вставки геометрии в меню рабочего протокола.



Рис. 8. Интерфейс режима просмотра изображения.

ния отображается в строке состояния и хода выполнения сканирования.

Во время сканирования пользователь может осуществлять:

- просмотр уже полученных изображений;
- прицеливание следующих последовательностей;
- настройку параметров следующих последовательностей;
- копирование «геометрии» (ориентации и смещения слоев) из одной последовательности в другие. Для этого пользователь выделяет исходную последовательность в рабочем протоколе и далее вызывает контекстное меню правой кнопкой мыши, в котором выбирает команду «Копировать геометрию».

После чего выделяется последовательность в протоколе, в которую необходимо произвести копирование, и также с помощью контекстного меню выполняется команда «Вставить геометрию» (рис. 7).

Просмотр изображений

Хотя программа не предназначена для финальной обработки результатов исследования (за это отвечает АРМ врача), у пользователя есть возможности для предварительного просмотра полученных изображений.

При выводе изображения (рис. 8) на экран, к нему также добавляется информация:

- 1 – порядковый номер слоя;
 - 2 – краткая информация о параметрах сканирования;
 - 3 – краткая информация о параметрах изображения;
 - 4 – стандартные маркеры ориентации (H/F/L/R/A/P).
- Доступны следующие элементы управления просмотром:

- Переключение режима отображения «стопкой» / «списком» – кнопкой на панели управления
- Изменение масштаба изображений (в режиме «списком») – клавишей Ctrl + колесико мыши.
- Прокрутка изображений в режиме «стопкой» – колесиком мыши.
- Прокрутка списка изображений – колесиком мыши.
- Изменение яркости/контраста – перемещением мыши при зажатой правой кнопке.
- Восстановление исходных яркости/контраста – клавишей Ctrl + двойным щелчком левой кнопкой мыши.

Сохранение изображений и завершение сканирования

Сохранение полученных изображений происходит автоматически, сразу же по окончании сканирования очередного шага. Изменения яркости/контраста в процессе просмотра изображений не отражаются на сохраненных изображениях.

После того, как все необходимые последовательности были отсканированы, пользователь, по кнопке «Выход» завершает работу программы, при этом результаты исследования автоматически загружаются в АРМ врача.

Изменение протоколов исследования. Для удобства пользователей протоколы в Программе можно изменять следующим образом:

- добавить или удалить последовательности;

изменить параметры последовательности (ориентацию, число накоплений и т.д.);

изменить порядок выполнения шагов протокола (статусы шагов).

Сохранение отредактированного протокола запрашивается при завершении работы программы, а также в случае выбора какого-либо другого протокола из доступных в области выбора. При этом пользователь должен подтвердить сохранение протокола.

Также возможно сохранение протокола по команде пользователя. Для этого с помощью правой кнопки мыши вызывается контекстное меню в области выбора.

Программа предусматривает два вида протоколов: системные, и пользовательские. По умолчанию используются системные протоколы, которые нельзя изменять. Однако пользователь может отредактировать системный протокол и сохранить его копию. При этом пользователь должен ввести имя нового (скопированного) протокола.

Мастер-режим

Работа в мастер-режиме (режиме настройки томографа) доступна только пользователям системы с правами инженерного персонала.

Запуск мастер-режима (рис. 9) осуществляется по нажатию кнопки  на панели инструментов.

При этом интерфейс программы видоизменяется следующим образом:

На панели инструментов (1) отображаются команды:

 – Выход из мастер-режима.

«Графики» – вызов окна управления графиками сигналов.

«Шкала» – включение/выключение отображения шкалы на графиках.

«1...8» – переключение активного (отображаемого) канала.

«Все каналы» – включение режима отображения сигналов со всех каналов.

«Pre-emphasis» – запуск программы настройки компенсации вихревых токов.

В области управления томографом (2) выводятся следующие параметры:

«К-т усиления RX» – коэффициент усиления приемника (дБ);

«К-т аттенюации RX» – коэффициент аттенюации приемника (дБ);

«Спектр» – признак отображения на графиках спектра сигнала;

«Сдвиг центр. частоты» – текущее значение сдвига центральной частоты (Гц).

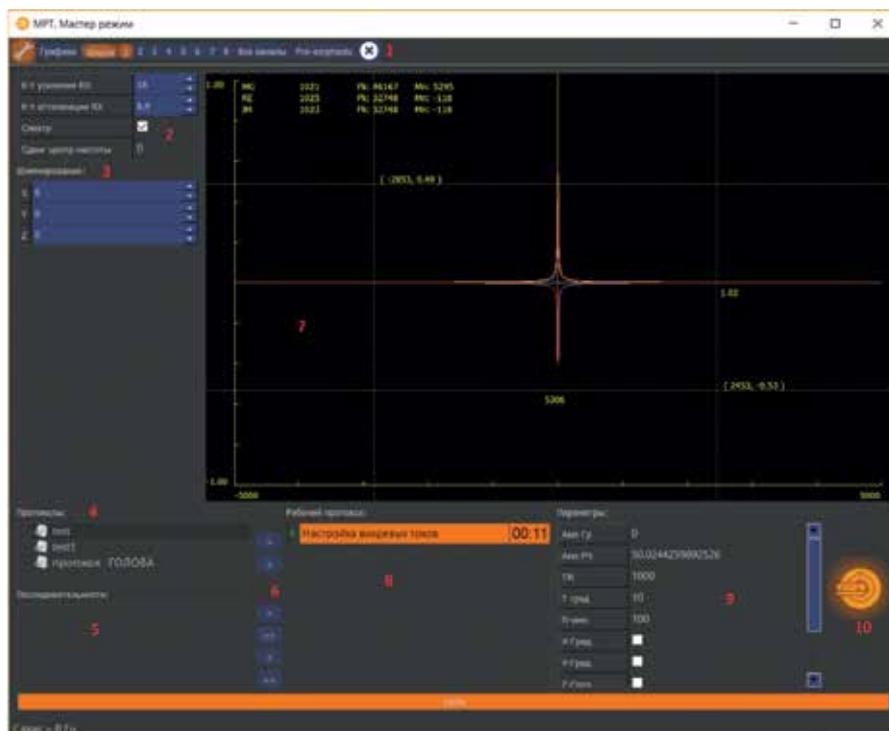


Рис. 9. Интерфейс программы в мастер-режиме. 1 – панель инструментов, 2 – область управления томографом, 3 – область управления шиммированием, 4 – область выбора протокола, 5 – список доступных последовательностей, 6 – кнопки управления протоколом, 7 – область отображения, 8 – рабочий протокол, 9 – таблица управления параметрами, 10 – кнопка запуска сканирования.

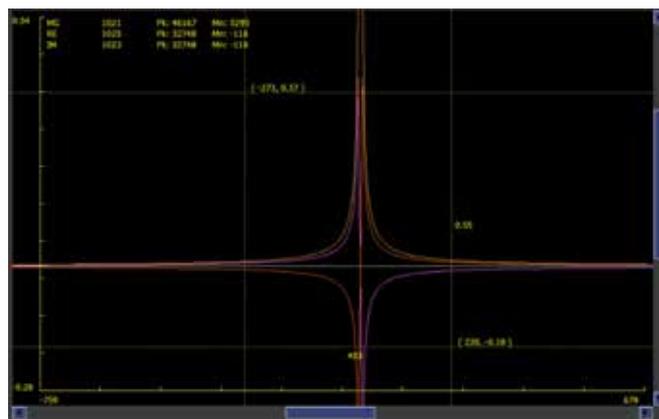


Рис. 10. Интерфейс программы в режиме работы с графиками.

В области управления шиммированием (3) выводятся значения шиммирующих подставок по каналам X, Y, Z.

Область выбора протокола (4), список доступных последовательностей (5), кнопки управления протоколом (6) в инженерном режиме неактивны.

В области отображения (7) выводятся графики сигналов томографа, получаемые в результате выполнения выбранной в рабочем протоколе (8) настроечной последовательности.

Запуск настроечной последовательности производится по нажатию кнопки сканирования (10). После этого последовательность будет выполняться циклически.

ски, до тех пор, пока не будет нажата кнопка (10) для ее остановки.

Параметры настроечной последовательности могут быть изменены с помощью таблицы управления параметрами (9). Некоторые из параметров могут быть изменены непосредственно в процессе выполнения последовательности.

Рассмотрим подробнее возможности управления выводом графиков (рис. 10):

1. Вертикальная шкала отображает значения уровня сигнала (1 – максимально возможная амплитуда).

2. Горизонтальная шкала отображает значения либо номера точки сбора, либо частоты (в режиме «спектр»).

3. Одновременно возможно отображение нескольких графиков (заданных пользователем) разными цветами.

4. В верхнем левом углу отображаются основные характеристики сигнала (координаты пикового (максимального) значения – Гц или точки сбора, пиковое значение сигнала, среднее значение сигнала. Три строки соответствуют значениям для модуля, вещественной и мнимой частей сигнала.

5. Масштаб отображения графиков может быть изменен: по вертикали – с помощью колесика мышки, по горизонтали – с помощью колесика мышки одновременно с нажатием кнопки Ctrl. При этом в случае большого увеличения масштаба, можно перемещать отображаемую область с помощью полос прокрутки.

6. Масштаб отображения графиков может быть восстановлен до стандартного – по двойному щелчку левой кнопки мышки в области просмотра одновременно с нажатием кнопки Ctrl.

7. По нажатию левой кнопки мышки отображаются пунктирные линии измерений на графиках. Координаты точки показаны рядом с перекрестием линий измерения в скобках. Если при нажатой левой кнопке мышки переместить её – появляется второе перекрестие с отображением новых координат на графике. Также измеряются расстояния по вертикали и по горизонтали между исходной и конечной точками.

8. По нажатию правой кнопки мыши и удержании ее отображается всплывающее окно с «легендой» графиков.

В верхней таблице показаны все настроенные для данной последовательности графики.

Технические характеристики магнитно-резонансного томографа МРТ4.1.

1. Магнит.

Тип магнита – сверхпроводящий туннельной конструкции с криорефрижератором и компрессором.

Индукция магнитного поля – 1,5 Тл.

Неоднородность магнитного поля в сфере 160 мм – не более 20 ppm.

Диаметр туннеля для размещения пациента – 220 мм.

Масса магнита – не более 500 кг.

Расстояние от изоцентра магнитной системы до эквипотенциальных поверхностей поля с уровнем индукции 5 Гс, определяющих границы области контролируемого доступа – не более 1,6 м по всем трем осям координат.

Встроенная система компенсации паразитных низкочастотных (6-50 Гц) магнитных полей.

Периодичность доливки жидкого гелия – 1 раз в 3 года.

2. Градиентная система.

Максимальные градиенты – 15 мТл/м.

Минимальное время переключения – 500 мкс.

Градиентные усилители:

– 1 фазное питание 220В ± защита от перегрева и перегрузки;

– максимальный выходной ток – 100 А;

– индикация состояния усилителя, выведенная на переднюю панель.

3. Передатчик.

Максимальная мощность – 200 Вт.

Входной импеданс – 50 Ом.

Диапазон частот – 64 ± 1 МГц

4. Приемные катушки.

Комплект приемных радиочастотных катушек включает в себя:

– стандартную катушку для исследования колена диаметром 160 мм,

– катушку для исследования колена увеличенного размера диаметром 180 мм,

– катушку для исследования верхних конечностей диаметром 130 мм.

Тип конструкции витковой части катушек – «птичья клетка».

Резонансная частота катушек – 64 ± 1 МГц.

Добротность в нагруженном состоянии – не хуже 30 дБ.

Развязка между каналами – не менее –20 дБ.

5. Консоль оператора.

Основной компьютер – ПК на базе процессора Intel PentiumI3, 3.0 Гц;

Оперативная память – 4096 Мб;

Жесткий диск – 800 Гб;

Монитор – 19” LCD;

Локальная сеть Ethernet;

CD R/W;

Клавиатура;

Манипулятор «Мышь»;

Источник бесперебойного питания UPS 620VA;

Операционная система Microsoft Windows XP;

Программное обеспечение:

– база данных пациентов и изображений;

– программа управления сканированием;

– программа визуализации и анализа изображений.

6. Спектрометр.

Плата DSP:

– сигнальный процессор – Texas Instrument TMS320C6713;

– быстродействие – 1.3 GFLOP's (операций с плавающей точкой);

– внутренняя память процессора – 256 Кб;

– статическая память на плате – 2x64 Мб;

– 2 последовательных порта 400 Мбит/с;

– 20 – разрядный цифровой порт;

– PCI – Host Port интерфейс.

Плата градиентов:

– четыре 16-ти разрядных ЦАП с быстродействием 250 кГц;

- четыре низкочастотных фильтра;
- четыре выходных дифференциальных усилителя;
- опто-электронная развязка цифровой и аналоговой части;
- диапазон выходных напряжений ± 10 В

Радиочастотная плата:

- цифровой квадратурный приемник без промежуточного преобразования частоты;
- входной усилитель с программируемым коэффициентом усиления;
- встроенные цифровые антиалайзинговые фильтры;
- разрядность АЦП приемника – 14;
- быстродействие АЦП приемника – 250 МГц;
- цифровой передатчик с возможностью амплитудной, частотной и фазовой модуляции;
- 16-ти разрядный ЦАП огибающей радиоимпульса;
- опто-электронная развязка цифровой и аналоговой части.

Характеристики изображений:

- минимальная толщина слоя – 3 мм в режимах 2D, 1 мм в режиме 3D;
- размер матрицы изображения – от 64x64 до 512x512;
- количество одновременно получаемых срезов: 24 в режимах 2D; 36 в режиме 3D;
- ориентация плоскости сечения – аксиальная, сагитальная, фронтальная, наклонная с углом наклона до 45 градусов.

Заключение

В результате проведенных исследований опытного образца МРТ предлагается следующая стратегия развития: создание томографов с полем 3 Тл и 7 Тл; изучение вопросов применения гиперполяризованных газов и фокусированного ультразвука большой интенсивности для удаления опухолей головного мозга; создание более гибкого программного обеспечения с возможностью реализации расширенной библиотеки импульсных программ; совершенствование интерфейса пользователя в части редактирования последовательностей, их настройки и графической визуализации доработка ПО с целью обеспечения возможности интеграции томографа в информационные системы PACS медицинских учреждений.

Список литературы

1. Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Troitskiy V.F. 8 T Cryogen Free Magnet With a Variable Temperature Insert Using a Heat Switch. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010; 20(3): 612-615. DOI: 10.1109/TASC.2010.2041592
2. Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Rybakov A.S., Tsyachnykh Y.V. Performance Test of 1.5 T Cryogen-Free Orthopedic MRI Magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018; 28(3): Article number: 4400704. DOI: 10.1109/TASC.2017.2784402

3. Kostrov E.A., Demikhov E.I., Bagdinov A.V., Demikhov T.E., Lysenko V.V., Tsyachnykh Y.V. Magnetic Field Operation and Shielding of a G-M Cryocooler. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016; 26(4): Article number: 0601305. DOI: 10.1109/TASC.2016.2522821
4. Rybakov A.S., Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Tsyachnykh Y.V. 1.5 T Cryogen Free Superconducting Magnet for Dedicated MRI. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016; 26(4): Article number: 4400403. DOI: 10.1109/TASC.2016.2517328
5. Наумов П.Г., Любутин И.С., Фролов К.В., Демихов Е.И. Криостат замкнутого цикла для оптической и мёссбауэровской спектроскопии в диапазоне температур 4.2-300 К. *Приборы и техника эксперимента*. 2010; 5: 158-164. DOI: 10.1134/S0020441210050301
6. Demikhov T.E., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Demikhov E.I., Piskunov N.A. 9 T NbTi Cryogen Free HTS Test Stand. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2012; 22(3): Article number: 9501004. DOI: 10.1109/TASC.2011.2178994
7. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Krokhin O.N., Mikhailova G.N., Menushenkov A.P., Nikulin V.Ya., Oginov A.V., Podlivaev A.I., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Troitskii A.V. Effect of shock waves on the current-carrying properties of HTSC YBCO(123) tape. *Doklady physics*. 2009; 54(10): 463-465. DOI: 10.1134/S1028335809100061

References

1. Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Troitskiy V.F. 8 T Cryogen Free Magnet With a Variable Temperature Insert Using a Heat Switch. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010; 20(3): 612-615. DOI: 10.1109/TASC.2010.2041592
2. Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Rybakov A.S., Tsyachnykh Y.V. Performance Test of 1.5 T Cryogen-Free Orthopedic MRI Magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018; 28(3): Article number: 4400704. DOI: 10.1109/TASC.2017.2784402
3. Kostrov E.A., Demikhov E.I., Bagdinov A.V., Demikhov T.E., Lysenko V.V., Tsyachnykh Y.V. Magnetic Field Operation and Shielding of a G-M Cryocooler. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016; 26(4): Article number: 0601305. DOI: 10.1109/TASC.2016.2522821
4. Rybakov A.S., Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Tsyachnykh Y.V. 1.5 T Cryogen Free Superconducting Magnet for Dedicated MRI. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016; 26(4): Article number: 4400403. DOI: 10.1109/TASC.2016.2517328
5. Naumov P.G., Lyubutin I.S., Frolov K.V., Demikhov E.I., [Closed Cycle cryostat for optical and Mössbauer spectroscopy in the temperature range 4.2-300 K]. *Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]*. 2010; (5): 158-164. DOI: 10.1134/S0020441210050301 (In Russian)
6. Demikhov T.E., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Demikhov E.I., Piskunov N.A. 9 T NbTi Cryogen Free HTS Test Stand. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2012; 22(3): Article number: 9501004. DOI: 10.1109/TASC.2011.2178994
7. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Krokhin O.N., Mikhailova G.N., Menushenkov A.P., Nikulin V.Ya., Oginov A.V., Podlivaev A.I., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Troitskii A.V. Effect of shock waves on the current-carrying properties of HTSC YBCO(123) tape. *Doklady physics*. 2009; 54(10): 463-465. DOI: 10.1134/S1028335809100061

Сведения об авторах

Чехонин Владимир Павлович – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой медицинских нанобиотехнологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И.Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Мажуга Александр Георгиевич – доктор химических наук, ректор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И.Менделеева»

Багдинова Анна Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории криогенной техники и МРТ Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Рыбаков Александр Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории криогенной техники и МРТ Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Демихов Евгений Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделением физики твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Демихов Тимофей Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории криогенной техники и МРТ Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Лысенко Валерий Викторович – научный сотрудник лаборатории криогенной техники и МРТ Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Мишкинис Борис Янович – кандидат технических наук, президент компании ООО «С.П. Гелпик»

Константинов Максим Валерьевич – главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Тарасов Виктор Петрович – кандидат физико-математических наук, главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Шумм Борис Аркадьевич – кандидат физико-математических наук, главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Шумм Алексей Борисович – кандидат физико-математических наук, главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Пистрак Григорий Михайлович – кандидат технических наук, главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева» Российской академии наук

Пистрак Александр Григорьевич – главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук

Дмитриев Дмитрий Станиславович – главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени Н.П.Лебедева» Российской академии наук