



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01R 33/4215 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016101066, 16.06.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.06.2014

Дата регистрации:
28.05.2018

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
17.06.2013 EP 13172199.5

(43) Дата публикации заявки: 24.07.2017 Бюл. № 21

(45) Опубликовано: 28.05.2018 Бюл. № 16

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 18.01.2016

(86) Заявка РСТ:
EP 2014/062528 (16.06.2014)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2014/202514 (24.12.2014)

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б.Спасская, 25, строение 3,
ООО "Юридическая фирма Городисский и
Партнеры"

(72) Автор(ы):

ОВЕРВЕГ Йоханнес Адрианус (NL)

(73) Патентообладатель(и):

КОНИНКЛЕЙКЕ ФИЛИПС Н.В. (NL)

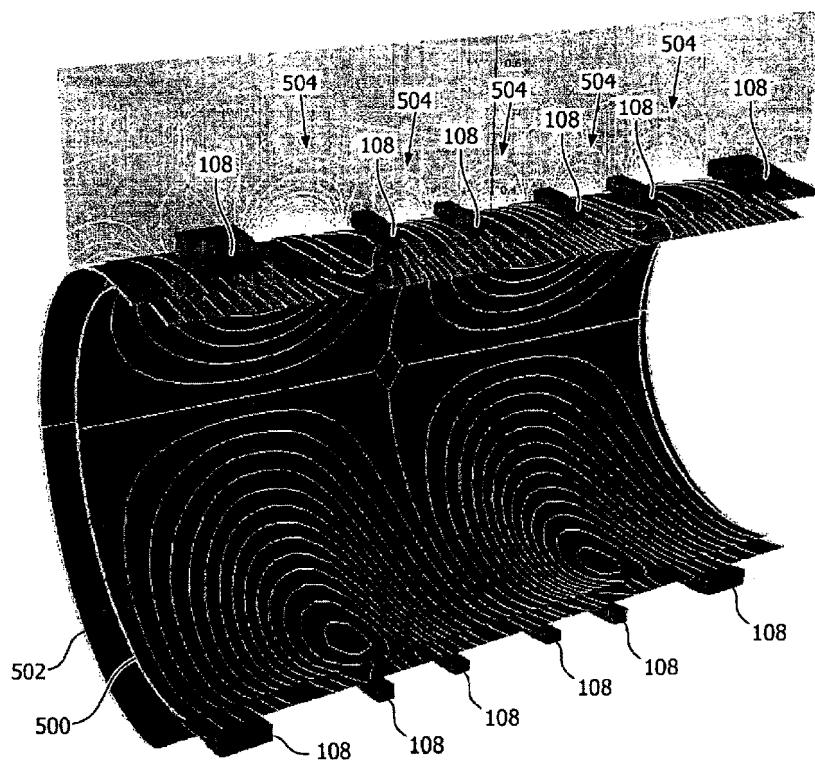
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: JP 2008229360 A, 02.10.2008. JP
2003164432 A, 10.06.2003. US 4733189 A1,
22.03.1988. RU 2483316 C1, 27.05.2013.

(54) ГРАДИЕНТНАЯ КАТУШКА МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

(57) Реферат:

Группа изобретений относится к магнитно-резонансной визуализации. Магнитный узел для системы магнитно-резонансной визуализации содержит магнитную градиентную катушку с активным экранированием, выполненную с возможностью создания магнитного поля, причем магнитное поле имеет цилиндрическую ось симметрии, причем градиентная катушка имеет длину, параллельную цилиндрической оси симметрии, причем магнитная градиентная

катушка имеет внешнюю поверхность, магнитное поле содержит внешнее магнитное поле снаружи от внешней поверхности, и причем внешнее поле имеет по меньшей мере четыре области ослабленного поля вдоль длины, где модуль магнитного поля меньше среднего модуля магнитного поля вдоль длины. Технический результат – повышение эффективности градиентной катушки. 4 н. и 11 з.п. ф-лы, 13 ил.



ФИГ. 5



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01R 33/4215 (2006.01)

(21)(22) Application: **2016101066, 16.06.2014**

(24) Effective date for property rights:
16.06.2014

Registration date:
28.05.2018

Priority:

(30) Convention priority:
17.06.2013 EP 13172199.5

(43) Application published: **24.07.2017** Bull. № 21

(45) Date of publication: **28.05.2018** Bull. № 16

(85) Commencement of national phase: **18.01.2016**

(86) PCT application:
EP 2014/062528 (16.06.2014)

(87) PCT publication:
WO 2014/202514 (24.12.2014)

Mail address:
**129090, Moskva, ul. B.Spasskaya, 25, stroenie 3,
OOO "Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):

OVERVEG Jokhannes Adrianus (NL)

(73) Proprietor(s):

KONINKLEJKE FILIPS N.V. (NL)

(54) **MAGNETIC RESONANCE IMAGING GRADIENT COIL**

(57) Abstract:

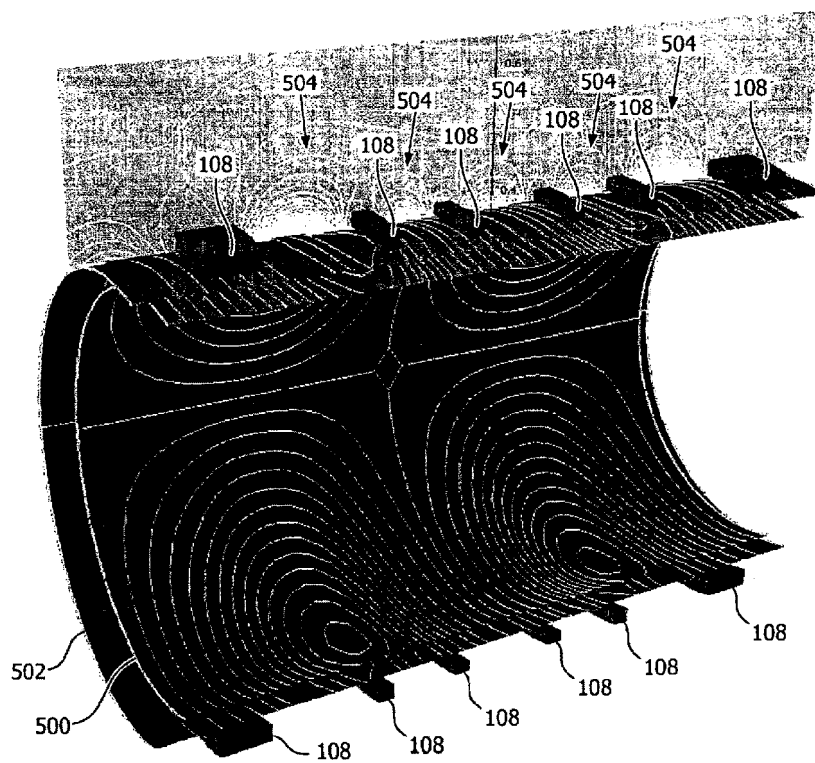
FIELD: instrument engineering.

SUBSTANCE: group of inventions relates to magnetic resonance imaging. Magnet assembly for a magnetic resonance imaging system comprises an actively shielded magnetic gradient coil operable for generating a magnetic field, wherein the magnetic field has a cylindrical axis of symmetry, wherein the gradient coil has a length parallel with the cylindrical axis of symmetry, wherein the magnetic gradient coil has an

outer surface, the magnetic field comprises an external magnetic field outside of the outer surface, and wherein the external field has at least four reduced field regions along the length where the modulus of the magnetic field is less than the average of the modulus of the magnetic field along the length.

EFFECT: technical result is an increase in the efficiency of the gradient coil.

15 cl, 13 dwg



ФИГ. 5

RU 2655474 C2

RU 2655474 C2

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Изобретение относится к магнитно-резонансной визуализации, в частности, к проектированию и конструированию магнитных градиентных катушек.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

5 Магнитное поле используется при Магнитно-Резонансной визуализации для выравнивания ядерных спинов, как часть процедуры создания изображений, внутри тела пациента. Это магнитное поле называется полем B₀. При МРИ-сканировании, Радиочастотные (РЧ) импульсы, создаваемые передатчиком или усилителем и антенной, вызывают возмущения в локальном магнитном поле и могут быть использованы для
10 управления ориентацией ядерных спинов относительно поля B₀. Пространственное декодирование магнитных спинов может быть осуществлено, используя так называемые градиентные катушки, которые используются для наложения поля магнитного градиента на магнитное поле B₀. РЧ сигналы, испускаемые ядерными спинами, обнаруживаются катушкой приемником, и эти РЧ сигналы используются для создания МРИ-изображений.

15 Магниты, используемые для создания поля B₀, типично используют сверхпроводящие катушки. Магнитное поле, создаваемое градиентными катушками, может вызывать вихревые токи в сверхпроводящих катушках. Этих вихревых токов можно избежать или уменьшить, используя градиентные катушки с активным экранированием. Патент США US 4,733,189 раскрывает активный экран вокруг формирующих градиент
20 составляющих системы магнитно-резонансной визуализации.

Градиентная катушка магнитного поля с активным экранированием, известная из JP2008-229360, имеет распределение поля, расширяющееся радиально и имеющее три продольные области, в которых расширяется градиентное поле рассеяния. Эта градиентная катушка с экранированием имеет, соответственно, соседние с областями
25 поля рассеяния маленькие области, где поле рассеяния относительно мало.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Изобретение предусматривает магнитную градиентную катушку, магнитный узел, систему магнитно-резонансной визуализации и способ и проект магнитной градиентной катушки в независимых пунктах формулы изобретения. Варианты осуществления
30 приведены в зависимых пунктах формулы изобретения.

Как будет приниматься во внимание специалистом в данной области техники, аспекты настоящего изобретения могут быть воплощены как устройство, способ, или компьютерный программный продукт. Соответственно, аспекты настоящего изобретения могут принимать форму полностью аппаратного варианта осуществления, полностью программно реализованного варианта осуществления (включающего в
35 себя микропрограммное обеспечение, резидентное программное обеспечение, микрокод, и т. п.) или варианта осуществления, объединяющего программные и аппаратные аспекты, которые, в целом, все могут указываться ссылкой в материалах настоящей заявки как «схема», «модуль» или «система». Более того, аспекты настоящего изобретения могут принимать форму компьютерного программного продукта, реализованного в одном или более машинно-читаемом носителе(ях), имеющего выполняемый компьютером код, сохраненных на нем.

Любая комбинация одного ли более машинно-читаемых носителей может быть использована. Машинно-читаемым носителем может быть машинно-читаемый
45 сигнальный носитель или машинно-читаемым носитель данных. "Машинно-читаемым носителем данных", в контексте материалов настоящей заявки, охватывает любой материальный носитель данных, который может хранить команды, которые могут исполняться процессором вычислительного устройства. Машинно-читаемым носителем

данных может называться машинно-читаемым постоянным носителем данных.

Машинно-читаемый носитель данных может также называться постоянным машинно-читаемым носителем. В некоторых вариантах осуществления, машинно-читаемый носитель данных может также хранить данные, которые могут быть доступны для процессора вычислительного устройства. Примеры машинно-читаемого носителя данных включают, но не в качестве ограничения: магнитный диск, магнитный накопитель на жестком диске, твердотельный жесткий диск, флэш-память, USB флэш-накопитель, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оптический диск, магнитно-оптический диск и регистровый файл процессора. Примеры оптических дисков включают компакт-диск (CD) и цифровой многофункциональный диск (DVD), например, CD-ROM, CD-RW, CD-R, DVD-ROM, DVD-RW или DVD-R диски. Термин машинно-читаемый носитель данных также относится к различным типам записывающих носителей, которые могут быть доступны для компьютерного устройства через сеть или по линии связи. Например, данные могут быть возвращены через модем, через интернет или через локальную сеть. Выполняемый компьютером код, воплощенный на машинно-читаемом носителе, может быть передан с использованием любого подходящего носителя, включая, но не в качестве ограничения, беспроводные, проводную линию, оптоволоконный кабель, РЧ, и т. д., или любую подходящую комбинацию вышеизложенных.

Машинно-читаемый сигнальный носитель может включать распространяемый сигнал данных с выполняемым компьютером кодом, воплощенном на нем, например, в основной полосе частот или как часть несущей волны. Такой распространяемый сигнал может принимать любую из многообразия форм, включая, но не в качестве ограничения, электромагнитную, оптическую или любую подходящую их комбинацию. Машинно-читаемый сигнальный носитель может быть любым машинно-читаемым носителем, который не является машинно-читаемым носителем данных, и который может передавать, распространять или транспортировать программу для использования посредством или в связи с системой, устройством или прибором выполнения команд.

"Компьютерная память" или "память" является примером машинно-читаемого носителя данных. Компьютерной память - это любая память, которая напрямую доступна процессору. "Компьютерное запоминающее устройство" или "запоминающее устройство" является дополнительным примером машинно-читаемого носителя данных. Компьютерное запоминающее устройство - это любой энергонезависимый машинно-читаемый носитель данных. В некоторых вариантах осуществления компьютерное запоминающее устройство может также быть компьютерной памятью или наоборот.

"Процессор", в контексте материалов настоящей заявки, охватывает электронные компоненты, которые способны выполнять программы, или машинно-выполняемые команды или выполняемый компьютером код. Ссылки на вычислительные устройства, содержащие "процессор", следует интерпретировать как возможно содержащие более чем один процессор или вычислительное ядро. Процессор может, например, быть многоядерным процессором. Процессор может также ссылаться на совокупность процессоров внутри одной компьютерной системы или распределенную между несколькими компьютерных систем. Термин вычислительное устройство следует также интерпретировать как, возможно, ссылающийся на совокупность или сеть вычислительных устройств, каждое из которых содержит процессор или процессоры. Выполняемый компьютером код может быть выполнен несколькими процессорами, которые могут быть внутри одного вычислительного устройства, или которые могут даже быть распределены между несколькими вычислительными устройствами.

Выполняемый компьютером код может содержать машинно-исполняемые команды или программу, которая заставляет процессор выполнять аспект настоящего изобретения. Выполняемый компьютером код для проведения операций для аспектов настоящего изобретения может быть написан на любой комбинации одного или более языков программирования, включая объектно-ориентированный язык программирования, такие как Java, Smalltalk, C++ или подобные, и традиционные языки процедурного программирования, такие как язык программирования "C" или похожие языки программирования, и скомпилирован в машинно-исполняемые команды. В некоторых случаях, выполняемый компьютером код может быть в форме языка высокого уровня или в предкомпилированной форме, и может быть использован во взаимосвязи с интерпретатором, который создает машинно-исполняемые команды на лету.

Выполняемый компьютером код может полностью выполняться на компьютере пользователя, частично на компьютере пользователя, в качестве автономного пакета программного обеспечения, частично на компьютере пользователя и частично на удаленном компьютере, либо полностью на удаленном компьютере или сервере. В последнем сценарии, удаленный компьютер может быть присоединен к компьютеру пользователя через любой тип сети, включая локальную сеть (LAN) или глобальную сеть (WAN), либо может быть создано присоединение к внешнему компьютеру (например, через сеть Интернет, с использованием поставщика услуг Интернет).

Аспекты настоящего изобретения описаны ниже со ссылкой на иллюстрации блок-схем последовательностей операций и/или структурных схем способов, устройств (систем) и компьютерных программных продуктов согласно вариантам осуществления изобретения. Будет понятно, что каждый блок или часть блоков блок-схемы последовательностей операций, иллюстраций и/или структурные схемы могут быть реализованы, когда приемлемо, командами компьютерной программы в форме выполняемого компьютером кода. Также понятно, что, если не взаимно исключаящие, комбинации блоков в различных блок-схемах последовательностей операций, иллюстрациях и/или структурных схемах могут быть объединены. Эти команды компьютерной программы могут выдаваться в процессор компьютера общего применения, компьютера специального назначения или другого программируемого устройства обработки данных, чтобы породить машину, из условия, чтобы команды, которые выполняются посредством процессора компьютера или другого программируемого устройства обработки данных, создавали средство для реализации функций/действий, заданных в структурном элементе или структурных элементах блок-схемы последовательности операций способа и/или структурной схемы.

Эти команды компьютерной программы также могут храниться на машинно-читаемом носителе, который может управлять компьютером, другим программируемым устройством обработки данных или другими устройствами, чтобы функционировали конкретным образом, из условия, чтобы команды, хранимые на машинно-читаемом носителе, создавали продукт, включающий команды, которые реализуют функцию/действие, заданные в структурном элементе или структурных элементах блок-схемы последовательности операций способа и/или структурной схемы.

Команды компьютерной программы также могут загружаться в компьютер или другое программируемое устройство обработки данных, другие устройства, чтобы заставлять последовательность операционных этапов выполняться на компьютере, другом программируемом устройстве или другом устройстве для создания реализуемой компьютером последовательности операций, из условия, чтобы команды, которые

выполняются на компьютере или другом программируемом устройстве, предусматривали процессы для реализации функций/действий, заданных в структурном элементе или структурных элементах блок-схемы последовательности операций способа или структурной схемы.

5 "Пользовательский интерфейс", в контексте материалов настоящей заявки, - это интерфейс, который позволяет пользователю или оператору взаимодействовать с компьютером или компьютерной системой. "Пользовательский интерфейс" может также называться "устройство с человеческим интерфейсом". Пользовательский интерфейс может предоставлять информацию или данные оператору и/или получать
10 информацию или данные от оператора. Пользовательский интерфейс может позволять получать ввод от оператора с помощью компьютера или может предоставлять вывод пользователю от компьютера. Другими словами, пользовательский интерфейс может позволять оператору контролировать и управлять компьютером, и интерфейс может позволять компьютеру показывать эффект от контроля и управления оператором.
15 Отображение данных или информации на дисплее или графическом пользовательском интерфейсе - это пример предоставления информации оператору. Прием данных через клавиатуру, мышь, трекбол, сенсорную панель, координатно-указательное устройство, графический планшет, джойстик, веб-камеру, гарнитуру, рычаг переключения передач, рулевое колесо, педали, перчатку с проводом, танцевальную платформу, пульт
20 дистанционного управления и акселерометр - это все примеры компонентов пользовательского интерфейса, которые позволяют получать информацию или данные от оператора.

"Аппаратный интерфейс", в контексте материалов настоящей заявки, охватывает интерфейс, который дает возможность процессору компьютерной системы
25 взаимодействовать с и/или контролировать внешнее вычислительное устройство и/или аппарат. Аппаратный интерфейс может позволять процессору отправлять управляющие сигналы или команды внешнему вычислительному устройству и/или аппарату. Аппаратный интерфейс может также давать возможность процессору обмениваться данными с внешним вычислительным устройством и/или аппаратом. Примеры
30 аппаратного интерфейса включают, но не в качестве ограничения: универсальную последовательную шину, порт стандарта IEEE 1394, параллельный порт, порт стандарта IEEE 1284, последовательный порт, порт стандарта RS-232, порт стандарта IEEE-488, Bluetooth соединение, беспроводное соединение через локальную сеть, соединение TCP/IP, соединение сети Ethernet, интерфейс управляющего напряжения, интерфейс MIDI,
35 интерфейс аналогового ввода и интерфейс цифрового ввода.

"Дисплей" или "устройство отображения", в контексте материалов настоящей заявки, охватывает устройство вывода или пользовательский интерфейс, приспособленный для отображения изображений или данных. Дисплей может выводить визуальные, аудио и/или тактильные данные. Примеры дисплеев включают, но не в качестве ограничения:
40 компьютерный монитор, телевизионный экран, сенсорный экран, тактильный электронный дисплей, экран Брайля, Электронно-лучевую трубку (ЭЛТ), Запоминающую трубку, Бистабильный дисплей, Электронную бумагу, Векторный дисплей, Дисплей с плоским экраном, Вакуумный флюоресцентный дисплей (ВФ), Дисплеи со светоизлучающим диодом (LED), Электролюминесцентный дисплей (ELD),
45 Плазменный дисплей (PDP), Жидкокристаллический дисплей (LCD), Дисплей на органических светоизлучающих диодах (OLED), проектор и Дисплей, устанавливаемый на голове.

Данные Магнитного Резонанса (MP) определены в материалах настоящей заявки

как записанные измерения радиочастотных сигналов, испускаемых атомными спинами антенны Магнитно-резонансного устройства во время сканирования способом магнитно-резонансной визуализации. Данные магнитного резонанса - это пример данных о медицинском изображении. Изображение магнитно-резонансной визуализации (МРИ) определено в материалах настоящей заявки как восстановленная двух- или трехмерная визуализация анатомических данных, содержащаяся в данных магнитно-резонансной визуализации. Визуализация может быть выполнена с использованием компьютера.

В одном аспекте изобретение предусматривает магнитную градиентную катушку для системы магнитно-резонансной визуализации. Магнитная градиентная катушка активно экранируется. Магнитная градиентная катушка с активным экранированием содержит несколько слоев с обмотками, которые используются для адаптации магнитного поля, созданного градиентной катушкой. Вообще, желательно создавать магнитные градиентные катушки в областях, где визуализация выполняется на субъектах. Внешнее магнитное поле от градиентных катушек может создавать помехи для сверхпроводящих магнитов, используемых для создания основного или так называемого магнитного поля B_0 , используемого для магнитно-резонансной визуализации. Такое магнитное взаимодействие может привести к индуцированным токам (которые создают нежелательные магнитные поля), нагреванию и, в экстремальном случае, даже к постепенной или внезапной потере поля магнитом основного поля.

Экранирующие обмотки магнитных градиентных катушек с активным экранированием используются для уменьшения или устранения магнитного поля, созданного магнитной градиентной катушкой за своими пределами. Магнитная градиентная катушка выполнена с возможностью создания магнитного поля. Магнит основного поля имеет цилиндрическую ось симметрии. Основное поле (B_0) направлено вдоль этой оси симметрии. Градиентные катушки спроектированы так, чтобы создавать заданные градиенты в составляющей поля, направленной вдоль цилиндрической оси симметрии; исходя из соображений сохранения магнитного потока, другие составляющие поля также будут присутствовать. В некоторых случаях, может быть так, что ось симметрии также является механической осью симметрии относительно корпуса или коробки магнитной градиентной катушки; однако так не обязательно должно быть. Например, внутренняя граница узла градиентной катушки не обязательно должна быть цилиндрической. Она может быть эллиптической, призматической или может быть асимметрична в направлении вверх или вниз. Градиентная катушка имеет длину параллельную цилиндрической оси симметрии. Длина, в контексте материалов настоящей заявки, - это просто направление или траектория в пространстве. Магнитная градиентная катушка имеет внешнюю поверхность. Магнитное поле содержит внешнее магнитное поле снаружи от внешней поверхности. Внешнее поле имеет по меньшей мере четыре области ослабленного поля вдоль длины, где модуль магнитного поля меньше среднего модуля магнитного поля вдоль длины. Другими словами, если выйти за пределы магнитной градиентной катушки на наружную поверхность градиентной катушки и измерить магнитное поле вдоль направленной траектории, которая параллельна цилиндрической оси симметрии, то получится по меньшей мере четыре области вдоль длины, где модуль магнитного поля меньше среднего модуля магнитного поля вдоль длины.

Традиционные магнитные градиентные катушки спроектированы так, что магнитное поле за пределами магнитной градиентной катушки уменьшается по всему объему,

непосредственно окружающему внешнюю границу градиентной катушки. Варианты осуществления изобретения сконструированы так, что области ослабленного поля есть только в отдельных местоположениях. Они могут быть выстроены в линию или быть сориентированы на катушки в основном магните. Осматривая магнитное поле снаружи магнитной градиентной катушки, становится ясно, что необходимо отличать магнитную градиентную катушку согласно варианту осуществления N1, который 0. Такая магнитная градиентная катушка, как описано в материалах настоящей заявки, может иметь несколько различных преимуществ. Прежде всего, магнитному полю по существу разрешено распространяться между местами, где катушки в основном магните могли бы быть расположены. Это делает магнитную градиентную катушку более эффективной, при этом по-прежнему уменьшая нежелательное магнитное взаимодействие с основным магнитом. Это также дает возможность использования источника питания с уменьшенными требованиями к мощности. Уменьшение требований к мощности также дает возможность использования источника питания магнитной градиентной катушки с уменьшенными требованиями к мощности и/или потреблением мощности.

Магнитная градиентная катушка, в контексте материалов настоящей заявки, охватывает одну или катушку для наложения так называемого градиента магнитного поля на зону визуализации или область, где выполняется магнитно-резонансная визуализация. Магнитная градиентная катушка используется для пространственного декодирования ядерных спинов так, что пространственно разложенные изображения могут быть восстановлены. Ссылки на "градиентную катушку" или "одну градиентную катушку" следует интерпретировать как одна или более или набор градиентных катушек. Несколько градиентных катушек используются в системе магнитно-резонансной визуализации для выполнения пространственного декодирования в трех измерениях. Для цилиндрического магнита, ось симметрии называется осью z. Z-градиентная катушка выполняет декодирование вдоль оси z. Две другие градиентные катушки типично используются для создания градиентов вдоль оси x и оси y. Эти другие две оси типично выбираются так, что они ортогональны друг другу и оси z. Градиентные катушки, соответствующие оси x и оси y, типично называются x-градиентная катушка и y-градиентная катушка, соответственно. Варианты осуществления включают замену одной или более традиционных градиентных катушек на градиентную катушку, описанную в материалах настоящей заявки. Каждая x-градиентная катушка, y-градиентная катушка и z-градиентная катушка имела бы свои отдельные слои в градиентной катушке или узле градиентных катушек.

В одном примере, x-градиентная катушка, y-градиентная катушка и z-градиентная катушка сконструированы согласно варианту осуществления. В другом примере, x-градиентная катушка и y-градиентная катушка сконструированы согласно варианту осуществления и z-градиентная катушка является традиционной градиентной катушкой с активным экранированием.

В другом варианте осуществления, линейный размер каждой области ослабленного поля, при измерении вдоль длины, составляет по меньшей мере 10% от расстояния между двумя соседними областями ослабленного поля. Это полезно, потому что область ослабленного поля фактически имеет большой объем, а не просто является отдельной точкой, где напряженность поля уменьшается.

В другом варианте осуществления, модуль внешнего поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 2,5 раза меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины. Этот вариант осуществления может быть полезен из-за ослабления поля, уменьшающего взаимодействие между магнитными градиентными катушками и

катушками в основном магните.

В другом варианте осуществления, модуль внешнего магнитного поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 5 раз меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины.

5 В другом варианте осуществления, модуль внешнего поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 10 раз меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины.

10 В другом варианте осуществления, модуль внешнего поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 20 раз меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины.

В альтернативных вариантах осуществления, модуль внешнего поля внутри всех областей ослабленного поля по меньшей мере в 20, 10, 5 или 2,5 раза меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины.

15 В другом варианте осуществления, градиентная катушка имеет внутренний проводящий слой и внешний проводящий слой. Внутренний проводящий слой и внешний проводящий слой сформированы катушками. Внутренний проводящий слой содержит первый набор отдельных токовых контуров, соединенных последовательно, внешний проводящий слой содержит второй набор отдельных токовых контуров, соединенных последовательно. Первый набор соединен последовательно со вторым набором.

20 В другом варианте осуществления, магнитная градиентная катушка содержит три отдельные градиентные катушки, выполняющие трехмерное пространственное декодирование. Зоны ослабленного поля всех трех градиентных катушек совпадают и соответствуют типичным положениям первичных катушек сверхпроводящего магнита. Ими, например, могут быть первичные катушки сверхпроводящего магнита для всего

25 тела, используемого при магнитно-резонансной визуализации.

В другом аспекте изобретение предусматривает магнитный узел для системы магнитно-резонансной визуализации, содержащей градиентную катушку с активным экранированием согласно варианту осуществления изобретения или магнита. Магнит - это сверхпроводящий магнит с несколькими сверхпроводящими катушками. Магнит

30 - это бескриогенный магнит (это означает, что секции магнита не погружены в большой объем жидкого гелия, но охлаждаются тепловым контактом с активным холодильником, и пространство между секциями основного магнита не содержит большого количества электропроводящего материала, такого как бак, содержащего гелий, охлаждаемого ванной магнита).

35 Бескриогенные магниты могут считаться магнитами, которые не используют большого количества жидкого криогенного вещества.

Бескриогенные магниты используют систему криогенной изоляции для того, чтобы иметь возможность охлаждать магнит до температуры около 4 Кельвинов, если используются традиционные низкотемпературные сверхпроводники, и может быть 30-50 К, в случае использования высокотемпературных сверхпроводников. Криогенная изоляция содержит внешний вакуумный контейнер, полностью закрывающий магнит, реализующий изолирующий вакуум вокруг холодной массы с очень низким давлением. Изоляция также имеет по меньшей мере один радиозащитный экран внутри вакуумного пространства, который имеет функцию перехвата теплоты излучения, исходящего от

45 теплой поверхности вакуумного контейнера. Термически соединяя этот радиозащитный экран с холодильником, почти вся эта теплота излучения убирается из системы. Экран, затем, предоставляет холодную поверхность, обращенную к холодным внутренним частям магнита, которая излучает гораздо меньше тепла, чем стена при комнатной

температуре. Традиционный (охлаждаемый ванной) магнит типично содержит 1000-2000 литров жидкого гелия в баке, окружающем магнитные катушки. Бескриогенный магнит может работать с гелиевым оборудованием в несколько литров.

5 Есть сверхпроводящая катушка, выбранная из нескольких сверхпроводящих катушек, центрированных соосно около каждой области ослабленного поля. Другими словами, катушки сверхпроводящих катушек ориентированы или расположены в областях ослабленного поля. Это полезно, потому что магнитное поле способно распространяться между сверхпроводящими катушками магнита при том, что даже в этом случае присутствует уменьшенное взаимодействие между магнитной градиентной катушкой
10 и несколькими катушками сверхпроводящего магнита.

Если магнит магнитно-резонансной визуализации, для которого магнитная градиентная катушка спроектирована, имеет зеркальную симметрию, схема областей ослабленного поля также содержит зеркальную симметрию или антисимметрию относительно плоскости Z_0 , где Z - это ось симметрии магнитного поля магнита.

15 В другом варианте осуществления магнит содержит трубу теплового туннеля и радиозащитный экран. Радиозащитный экран содержит внутренний цилиндр радиозащитного экрана между трубой теплового туннеля и несколькими сверхпроводящими катушками.

В другом варианте осуществления труба теплового туннеля и внутренний цилиндр
20 радиозащитного экрана не проводят электричество или имеют значительно большее электрическое сопротивление в азимутальном направлении, чем в направлении оси цилиндра. Этот вариант осуществления может быть полезен, потому что он дал бы возможность магнитному полю проникать в трубу теплового туннеля и внутренний цилиндр радиозащитного экрана.

25 В другом варианте осуществления, внутренний цилиндр сформирован из диэлектрика.

В другом варианте осуществления внутренний цилиндр радиозащитного экрана сформирован из проводящего материала с щелями, выполненными так, чтобы блокировать вихревые токи, создаваемые внешним магнитным полем магнитной градиентной катушки. Это полезно, потому что радиозащитный экран может быть
30 сделан из высоко-теплопроводящего материала такого как металл, однако, это по-прежнему позволило бы магнитному полю проходить сквозь него. Например, последовательность щелей, вырезанных параллельно центру оси магнита или градиентной катушки, позволила бы это.

В другом варианте осуществления внутренний цилиндр радиозащитного экрана
35 сформирован из диэлектрика.

В другом варианте осуществления, труба теплового туннеля содержит магнитную градиентную катушку. Этот вариант осуществления может быть полезен, потому что градиентная катушка используется для формирования трубы теплового туннеля. Это исключает компонент.

40 В другом варианте осуществления магнит является бескриогенным магнитом. Бескриогенный магнит - это магнит без жидкого гелия. Сверхпроводящие обмотки магнита МРИ не закрыты в электропроводящем баке с гелием, но окружены вакуумом. Катушки магнита охлаждаются посредством теплопроводности или циркулирующего газа и/или жидкости в охлаждающих трубках. Эти охлаждающие трубки могут быть
45 присоединены к холодильнику. В другом случае, магнит может охлаждаться посредством гелиевой ванны, но бак с гелием может иметь не проводящий электричество внутренний цилиндр, отделяющий жидкий гелий от изолирующего вакуума, в одном случае.

В другом варианте осуществления градиентная катушка выполнена так, чтобы

создавать внешнее магнитное поле такое, что оно расширяется между каждой сверхпроводящей катушкой. Это полезно, потому что уменьшается количество энергии, необходимое для питания магнитной градиентной катушки.

В другом аспекте изобретение предусматривает систему магнитно-резонансной визуализации, содержащую магнитный узел согласно варианту осуществления изобретения.

В другом аспекте изобретение предусматривает способ проектирования магнитной градиентной катушки для системы магнитно-резонансной визуализации, использующей программное обеспечение магнитного проектирования. Программное обеспечение магнитного проектирования, в контексте материалов настоящей заявки, охватывает программное обеспечение, которое принимает в качестве входа ограничения на проектируемое магнитное поле и использует информацию для вычисления положения обмоток для того, чтобы создать проект магнитной градиентной катушки.

Использование такого программного обеспечения магнитного проектирования типично используется конструкторами систем магнитно-резонансной визуализации. В силу этого, способ проектирования магнитной градиентной катушки по существу отличается от известных способов заданием ограничений иначе, чем это делается обычно.

Способ содержит этап задания цилиндрических поверхностей или контуров, соответствующих внутреннему проводящему слою и внешнему проводящему слою градиентной катушки. По выбору, этот этап может включать задание проводящих выступающих областей, соединяющих внутренний проводящий слой и внешний проводящий слой. Способ дополнительно содержит задание ограничений и вытеснение поля магнитного градиента с предопределенной линейностью в объем визуализации внутри градиентной катушки. Магнитная градиентная катушка имеет внешнюю поверхность. Способ дополнительно содержит задание ограничивающих пределов для внешнего магнитного поля, окружающее внешнюю поверхность, так, что есть по меньшей мере четыре области ослабленного поля, соответствующие расположению сверхпроводящих катушек сверхпроводящего магнита.

Альтернативно или включительно этот этап может также включать задание поверхностей, действующих как пассивные проводящие кольца в месторасположениях областей ослабленного поля, задавая ограничения на ток, индуцированный в этих кольцах, или рассеяние, вызванное этими ослабленными токами. Предыдущие три этапа задают задачу оптимизации при нахождении распределения тока во внутренней и внешней сформированных полем поверхностях, удовлетворяющего всем ограничениям и имеющего минимальную накопленную магнитную энергию и/или рассеяние магнитной накопленной энергии. Способ дополнительно содержит решение задачи оптимизации. Это, например, выполнялось бы автоматически с помощью программного обеспечения магнитного проектирования.

Способ дополнительно содержит преобразование функции непрерывного потока, полученное как результат оптимизации в схеме отдельных токовых контуров. Функция потока - это скалярная величина на поверхности со свойством, что разница в значении функции потока между любыми двумя точкам равна величине тока, проходящего между этими двумя точками. Изоконтурная линия диаграммы функции потока с определенным постоянным размером шага дает формы отдельных обмоток, каждая из которых пропускает ток равный этому размеру шага. Теория функций потока описана в докторской диссертации: G.N. Peeren, Stream Function Approach For Determining Optimal Surface Currents, Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2003.

Эти функции непрерывного потока могут быть аппроксимированы шаблоном

отдельных токовых контуров. Этот этап также содержит соединение этих отдельных токовых контуров последовательно для задания проекта градиентной катушки.

В другом варианте осуществления способ дополнительно содержит этап производства градиентной катушки согласно проекту градиентной катушки. Это в сочетании с другими этапами способа может считаться способом создания магнитной градиентной катушки.

Шаблоны токовых контуров могут, например, быть созданы как проволочная обмотка, печатная плата или вырезанные из листа меди части катушки.

Понятно, что один или более вышеупомянутых вариантов осуществления изобретения могут быть объединены при условии, что объединяемые варианты осуществления не являются взаимно исключающими.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

В последующем предпочтительные варианты осуществления изобретения будут описаны в качестве только примера и со ссылкой на чертежи, из которых:

Фиг. 1 показывает пример вида в поперечном разрезе и функционального вида системы магнитно-резонансной визуализации;

Фиг. 2 показывает дополнительный пример вида в поперечном разрезе и функционального вида системы магнитно-резонансной визуализации;

Фиг. 3 показывает блок-схему, которая иллюстрирует способ проектирования магнитной градиентной катушки;

Фиг. 4 показывает контур, который задает магнитную градиентную катушку с двумя слоями, и меньшие помеченные цилиндры представляют контуры, заданные для катушек сверхпроводящего магнита;

Фиг. 5 показывает пример типичного примера решения ослабленных внешних полей;

Фиг. 6 показывает график накопленной энергии в зависимости от внешнего радиуса катушки;

Фиг. 7 показывает такую же диаграмму для условий Фиг. 6, за исключением того, что рассеяние энергии показано вместо накопленной энергии;

Фиг. 8 показывает контуры магнитного поля в модели магнита, заданные сверхпроводящими катушками;

Фиг. 9 - накопленная энергия частично и полностью экранированной градиентной катушки в зависимости от внутреннего радиуса, для внешних радиусов 415 и 425 мм;

Фиг. 10 показывает рассеяние энергии в зависимости от внутреннего радиуса;

Фиг. 11 показывает визуализацию геометрии катушки, как было показанного на

Фиг. 5;

Фиг. 12 показывает схему проводников внутреннего проводящего слоя; и

Фиг. 13 показывает схему проводников внешнего проводящего слоя.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Одинаково пронумерованные элементы на этих фигурах либо эквивалентные элементы, либо выполняют такую же функцию. Элементы, которые были обсуждены ранее, не обязательно будут обсуждаться на более поздних фигурах, если функция эквивалентна.

Фиг. 1 показывает вид в поперечном разрезе и функциональный вид системы магнитно-резонансной визуализации 100. Система магнитно-резонансной визуализации 100 показана как содержащая магнит 102. Магнит 102, показанный на Фиг. 1, является сверхпроводящим магнитом цилиндрического типа. Магнит 102 содержит в своем центре тоннель 104. Однако, другие магниты также применимы для вариантов осуществления изобретения. Магнит 102 содержит криостат 106. Внутри криостата 106

находится совокупность сверхпроводящих катушек 108. Сверхпроводящие катушки 108 не закрыты в электропроводящем баке с гелием. Либо бак с гелием содержит внутренний, не проводящий электричество цилиндр, отделяющий жидкий гелий от вакуумной изоляции, либо катушки магнита охлаждаются посредством

5 теплопроводности или циркулирующего газа. В качестве альтернативного или дополнительного признака небольшое количество газообразного или жидкого гелия в охлаждающих трубках может быть использовано для охлаждения сверхпроводящих катушек, при этом охлаждающие трубки присоединены к холодильнику. Не все детали магнита показаны на Фиг. 1.

10 В туннеле магнита находится градиентная катушка магнитного поля 110, которая используется для получения данных магнитного резонанса для пространственного декодирования объектов в зоне 114 визуализации магнита 102. Градиентная катушка магнитного поля 110 присоединена к источнику питания градиентной катушки магнитного поля 112. Градиентная катушка магнитного поля 110 предназначена быть

15 образцом. Типично градиентные катушки магнитного поля содержат три отдельных набора катушек для пространственного декодирования в трех ортогональных пространственных направлениях. Зона 114 визуализации находится в центре магнита 102.

Рядом с зоной 114 визуализации расположена радиочастотная катушка 116 для

20 манипулирования ориентациями магнитных спинов в зоне 114 визуализации и для приема радиопередачи от спинов также в зоне 114 визуализации. Радиочастотная катушка 116 присоединена к радиочастотному приемопередатчику 118. Радиочастотная катушка 116 и радиочастотный приемопередатчик 118 могут быть заменены отдельными передающей и принимающей катушками и отдельными передатчиком и приемником.

25 Понятно, что радиочастотная катушка 116 и радиочастотный приемопередатчик 118 являются образцами различных возможностей.

В центре магнита также расположен субъект 120. Субъект 120 показан как покоящийся на опоре субъекта 122. Пунктирная линия 120 представляет цилиндрическую ось симметрии. Это может быть ось симметрии магнитной градиентной катушки 110

30 и/или магнита 102. В этом случае ось 130 симметрична относительно корпуса как магнита 102, так и магнитной градиентной катушки 110. Линия 132 - это направленная траектория или длина, параллельная оси 130, которая идет вдоль внешней поверхности магнитной градиентной катушки 134. Пунктирные линии делят магнит 102 и градиентную катушку 134 на ряд секций. Они помечены как 135, 136, 137, 138, 139, 140,

35 141, 142 и 143. Области 136, 138, 140 и 142 - это так называемые области ослабленного поля. Магнитное поле вдоль траектории 132 меньше, чем среднее вдоль всей траектории 132. Области 135, 137, 139, 141 и 143 - это области повышенного поля, и магнитное поле от градиентной катушки 110 может распространяться в эти области.

Радиочастотный приемопередатчик 118 и источник питания градиентной катушки магнитного поля 112 показаны как присоединенные к аппаратному интерфейсу 152

40 компьютерной системы 150. Компьютерная система 150 использует процессор 154 для управления системой магнитно-резонансной визуализации 100.

Компьютерная система 150, показанная на Фиг. 1, является образцом. Несколько процессоров и компьютерных систем может использоваться для представления

45 функциональных возможностей, проиллюстрированных одной этой компьютерной системой 150. Компьютерная система 150 содержит аппаратный интерфейс 152, который позволяет процессору 154 посылать и принимать сообщения от компонентов системы магнитно-резонансной визуализации 100. Процессор 154 также присоединен к

пользовательскому интерфейсу 156, компьютерному запоминающему устройству 158 и компьютерной памяти 160.

Радиочастотный передатчик 118 и источник питания магнитной градиентной катушки 112 присоединены к аппаратному интерфейсу 152 компьютерной системы 150.

5 Компьютерное запоминающее устройство 158 показано как содержащее последовательность импульсов.

Компьютерное запоминающее устройство 158 показано как содержащее последовательность импульсов 162. Последовательность импульсов 162 - это последовательность команд или информация, которая может быть использована для генерации команд для управления работой системы магнитно-резонансной визуализации 100 для получения данных магнитного резонанса. Компьютерное запоминающее устройство также показано как содержащее данные магнитного резонанса 164, которые были получены, используя последовательность импульсов 162. Компьютерное запоминающее устройство 158 также показано как содержащее магнитно-резонансное изображение 166, которое было восстановлено из данных магнитного резонанса 164.

Компьютерная память 160 показана как содержащая модуль управления 168. Модуль управления 168 содержит машинно-исполняемый код, который позволяет процессору 154 управлять работой и функционированием системы магнитно-резонансной визуализации 100. Это включает использование последовательности импульсов 162 для получения данных магнитного резонанса 164. Компьютерная память 160 дополнительно показана как содержащая модуль восстановления изображения 170. Модуль восстановления изображения содержит машинно-исполняемый код, который позволяет процессору 154 выполнять математические функции на данных магнитного резонанса 164 для восстановления магнитно-резонансного изображения 166.

25 Фиг. 2 показывает систему магнитно-резонансной визуализации 200 похожую на ту, что показана на Фиг. 1, однако, в этом примере магнит 102 показан более подробно. Также на этой Фиг. градиентная катушка используется как теплый тоннель 206.

Система сверхпроводящих катушек закрыта внешним вакуумным контейнером при комнатной температуре. Внутри внешнего вакуумного контейнера находится область вакуума 202. Сверхпроводящие катушки 108 расположены внутри вакуума 202 и индивидуально охлаждаются либо жидкостной, либо газовой системой охлаждения, присоединенной к системе охлаждения или к холодильной системе. Магнит 102 содержит теплый тоннель 206, который сформирован магнитной градиентной катушкой 110. Радиозащитный экран 204 находится между соединенными катушками 108, теплым тоннелем 206 и стенками магнита 102. Внутренний цилиндр 208 радиозащитного экрана находится между теплым тоннелем 206 и сверхпроводящими катушками 108. Теплый тоннель 206 и внутренний радиус радиозащитного экрана 208 оба выполнены так, чтобы позволять магнитному полю от градиентной катушки 110 проходить сквозь них. Это может быть осуществлено либо с помощью диэлектрических материалов, либо, в частности, в случае внутреннего цилиндра радиозащитного экрана 208 с помощью проводящего материала, но с вырезанными в нем щелями для того, чтобы позволить магнитному полю распространяться в области повышенного поля 135, 137, 139, 141 и 143.

45 Фиг. 3 показывает блок-схему, которая иллюстрирует способ проектирования магнитной градиентной катушки. Этап 300 - это задание цилиндрической поверхности или петель, соответствующих внутреннему проводящему слою и внешнему проводящему слою градиентной катушки, и необязательное задание проводящих выступающих областей, соединяющих внутренний проводящий слой и внешний проводящий слой.

Далее на этапе 302 задаются ограничения, направляющее поле магнитного градиента с предопределенной линейностью в объем визуализации внутри градиентной катушки. Объем визуализации может быть зоной визуализации. Магнитная градиентная катушка имеет внешнюю поверхность. Далее на этапе 304 задаются ограничения,

5 ограничивающие магнитное поле, окружающее внешнюю поверхность, так, что есть по меньшей мере четыре области ослабленного поля, соответствующие расположению сверхпроводящих катушек сверхпроводящего магнита. Это выполняется необязательно или с заданием поверхностей, действующих как пассивные проводящие кольца в местах расположения областей ослабленного поля, и задавая ограничения на ток,
10 индуцированный в этих кольцах, или рассеяние, вызванное этими индуцированными токами.

Этапы 300, 302, и 304 задают задачу оптимизации при нахождении распределения тока во внутренней и внешней сформированных полем поверхностях, удовлетворяющего всем ограничениям и имеющего минимальную накопленную магнитную энергию и/или
15 рассеяние. Эти внутренняя и внешняя сформированные полем поверхности затем будут преобразованы в проекты токового контура. Далее на этапе 306 задача оптимизации решается, используя программное обеспечение магнитного проектирования. И, наконец, на этапе 308 получаются функции непрерывного потока, которые определяют распределения тока во внутренней и внешней сформированных полем поверхностях,
20 которые были определены как результат шаблона оптимизации, преобразованы в шаблон отдельных токовых контуров, и соединяют эти отдельные токовые контуры последовательно для задания проекта градиентной катушки. Распределения тока во внутренней и внешней сформированных полем поверхностях задаются функцией непрерывного потока.

25 Активное экранирование градиентной катушки только в местах расположения секций сверхпроводящих магнитов, без ограничения внешнего поля в областях между этими секциями, может улучшить эффективность градиентной системы, по сравнению с конфигурацией полного активного экранирования, в 2 раза. Это позволяет строить систему с широким отверстием, используя магнит похожий на бескриогенный магнит,
30 который сейчас разрабатывается для недорогих сканеров с узким отверстием. Градиентные катушки с активным экранированием по существу не эффективны, потому что большая часть энергии поля находится в области между первичной и экранирующей обмотками.

Обеспечение возможности полю распространяться во внешнее пространство сделает катушку более эффективной, но приведет к нежелательному магнитному взаимодействию
35 с основным магнитом. Такого нежелательного взаимодействия можно избежать, используя проект катушки, раскрытый в материалах настоящей заявки.

Внешнее поле градиентной катушки экранируется только там, где расположены секции сверхпроводящей катушки основного магнита, и свободно распространяется в
40 магнитную среду в пространствах между магнитными обмотками.

Радиозащитный экран может быть сделан прозрачным для магнитных полей переменного тока, путем обеспечения большого числа осевых прерываний в проводящем цилиндре. Тоннель магнита может быть сделан из непроводящего материала; по выбору, градиентная катушка может служить как трубка канала криостата. Улучшение
45 эффективности может быть использовано для увеличения тоннеля для пациента. Градиентная катушка, совместимая с пространством для пациента диаметром в 700 мм и с накопленной энергией меньше чем 5 джоулей на 10 мТл/м, может быть установлена внутрь магнита с внутренним диаметром катушки 886 мм. Магнит такого размера был

бы достаточно большим только для сканера с узким отверстием, если бы использовалась традиционная градиентная катушка. Концепция преобразования внешнего поля может, но не должна быть объединена с нецилиндрическими формами внутренних градиентных обмоток. Концепция также может быть использована для уменьшения диаметра и стоимости магнита для сканера с узким отверстием. Когда применяется к z-градиентам, внешнее поле должно быть преобразовано так, что результирующий поток не взаимодействует с секциями основного магнита.

Если сверхпроводящий магнит не закрыт в традиционном баке, наполненном жидким гелием, и, если нет других электропроводящих цилиндров между секциями магнита, то внешнее поле градиентной катушки должно быть ограничено только в местах расположения магнитных обмоток. С подходящими инструментами проектирования градиента, возможно применять это и формировать проекты градиента, где поле градиента "пузырится" между этими секциями магнита. Результаты имитирования, описанного в материалах настоящей заявки, таковы, что эффективность градиентной катушки может быть улучшена в 1,5-2 раза. Этот прирост может быть использован для уменьшения расстояния между первичной и экранирующей катушками градиентной катушки, которое либо снижает размер и стоимость магнита на внешней поверхности градиентной катушки, либо увеличивает тоннель для пациента при постоянном диаметре магнита.

Секции сверхпроводящего магнита могут быть переоптимизированы для максимизации пространства для прохождения внешнего градиентного поля, но это предмет простого проектирования магнита.

Градиентная катушка, используемая в этой концепции, имеет различную форму, но может быть создана с использованием такой же технологии, как традиционные градиентные катушки с активным экранированием, которая сейчас используется в продукте.

1. Введение

Градиентная система в МР системе для всего тела - это одна из основных затратных составляющих системы. Она сжимается между пространством для пациента с РЧ системой и основным полем магнита, и оптимизация любого из них (большее отверстие, меньший, более дешевый магнит) увеличивает стоимость и сложность градиентной системы. Одной из причин, почему традиционные градиентные катушки с активным экранированием занимают так много места, является тот факт, что современные проекты стремятся уменьшить внешнее магнитное поле градиентной катушки путем взаимодействия со сверхпроводящим магнитом и его криостатом. Любое поле, покидающее внешнюю поверхность градиентной трубки, будет индуцировать вихревые токи в электропроводящих цилиндрах криостата, и модуляция поля в сверхпроводящих магнитных обмотках будет вызывать увеличение рассеяния в холодной массе. Если бы было возможно избавиться от слоя активного экранирования; первичные градиентные обмотки могли бы быть расположены близко к внутреннему отверстию криостата. Такая неэкранирующая градиентная катушка создала бы, однако, слишком много поля в криогенной среде традиционного МРИ магнита, охлаждаемого гелиевой ванной.

1.1. Цель

Имитирование было выполнено для выяснения того, имеет ли смысл ослаблять требования к внешнему полю градиентной катушки, по-прежнему оставляя ее несвязанной с обмотками основного поля сверхпроводящего магнита, но допуская поле в пространства между этими секциями обмотки. Для найденных решений, ключевые свойства градиентной катушки (накопленная энергия, рассеяние) были вычислены и

сопоставлены с такими же параметрами эквивалентной градиентной катушки, спроектированной с использованием традиционных способов и требований.

2. Модель и способ имитации

Градиентная катушка была смоделирована необычным образом как концентрические цилиндрические петли. Во всех имитациях, качество поля внутри катушки задавалось последовательностью ограничивающих точек в эллипсоидальном объеме, распространяющемся на 450 мм в радиальном направлении и на 360 мм в направлении оси z, с максимальным отклонением от линейного градиентного поля в 0.3 мТл с напряженностью градиента в 10 мТл/м. Базовый вариант полной компенсации поля рассеяния был смоделирован традиционным образом, путем ограничения индуцированного тока на вторичной поверхности в радиусе 10 мм снаружи от внешнего градиентного слоя. Для модели ослабленного поля рассеяния, секции сверхпроводящего магнита были смоделированы как тороидальные вторичные поверхности, покрывающие внешнюю границу наборов проводников (толщина стенок - 1 мм, удельное сопротивление - 10^{-9} Ом·м). Магнитом был модифицированный вариант проекта магнита 1,5 Тл с маленьким тоннелем (теплый тоннель ~ 820 мм), с меньшим отношением длина/толщина в секциях катушки. Это изменение увеличивает пиковое поле на проводнике, но не имеет большого влияния на количество проводников. Для каждого значения внешнего радиуса градиентной катушки формировался новый магнит. Пример геометрии модели показан на Фиг. 4.

Фиг. 4 показывает петлю 400, которая задает магнитную градиентную катушку с двумя слоями, и меньшие цилиндры, помеченные 402, представляют петли, заданные для катушек сверхпроводящего магнита.

Цель - оставить внешнее поле градиентной катушки вне объемов, занимаемых сверхпроводящим проводом, могла быть смоделирована как ограничения, ограничивающие нормальную составляющую поля на всех границах поверхностей объемов тороидальных проводов. Более простой способ достигнуть цели - ограничить рассеяние в поверхностях, ограничивающих катушки. Это было сделано путем присваивания тяжелого весового коэффициента на вклад этого рассеяния в функции затрат, и путем смещения общей оптимизации в сторону минимизации рассеяния.

Фиг. 5 показывает пример типичного решения ослабленных внешних полей. 500 показывает проект внутреннего проводящего слоя. Кольцевые линии указывают токовые петли, и 502 представляет внешний проводящий слой магнитной градиентной катушки. Цилиндры, помеченные 108, - это снова части сверхпроводящего магнита, и решение, которое вычислено программным обеспечением магнитного проектирования, показано выше внутреннего проводящего слоя 500, внешнего проводящего слоя 502 и сверхпроводящих катушек 108. Можно видеть, что имеется расширение магнитного поля 504 между соседними проводниками сверхпроводящего магнита.

Типичный пример решения с ограничениями ослабленного внешнего поля показан на Фиг. 5. Шаблон токов в экранирующей катушке по-прежнему напоминает таковую в классической активно экранирующей катушке, но форма обмоток стала более необычной. Диаграмма поля, показанная на Фиг. 5, ясно демонстрирует, что поле выступает в пространства между секциями катушки. Как будет более подробно показано в следующем разделе, ослабление внешнего поля сильно снижает как накопленную энергию, так и рассеяние градиентной катушки. Типично оба числа по крайней мере в 1,5 раза ниже, чем в случае ослабленного экранирования.

С ограничениями, использованными в имитации, типичное рассеяние в секциях магнита приблизительно равно 0,5 Вт или меньше (для среднего квадратичного 10 мТл/

м, 100% рабочего цикла). Границы катушки были смоделированы как листы меди толщиной 1 мм при температуре гелия, удельном сопротивлении 10^{-9} Ом•м. Если секции реального магнита закрыты такими тонкими прокладками (таким образом, что не формируются замкнутые проводящие контуры), рассеяние может быть оставлено в

3. Результаты параметрических исследований

В принципе, прирост эффективности, возникающий вследствие ослабления ограничений внешнего поля, может быть использован двумя способами. Либо габариты системы могут быть уменьшены при постоянном размере тоннеля для пациента, либо тоннель для пациента может быть увеличен при постоянном размере магнита. Оба пути были обследованы в настоящем исследовании.

3.1. Сжатие магнита при тоннеле для пациента 600 мм

Для градиентной катушки с внутренним радиусом 325 мм внешний радиус катушки изменялся от 360 до 425 мм. Результаты показаны на Фиг. 6 и Фиг. 7. Действие экрана обозначает традиционную полностью экранированную градиентную катушку, действие преобразовано - это сокращения для катушки, в которой поле преобразовано таким образом, чтобы оно держалось на расстоянии от магнитных обмоток.

Фиг. 6 показывает график накопленной энергии 600 в зависимости от внешнего радиуса катушки 602. Внешний радиус катушки задан в метрах и накопленная энергия - в произвольных единицах. Это показано для полностью экранированной градиентной катушки 604, которая экранирована традиционным способом, в сравнении с примером градиентной катушки с преобразованным полем. Формы градиентной катушки с преобразованным полем управляют для создания магнитного поля, которое уклоняется от сверхпроводящих катушек. Можно видеть, что накопленная энергия значительно меньше для преобразования поля.

Фиг. 7 показывает такую же диаграмму для условий Фиг. 6, за исключением того, что рассеяние энергии 702 показано вместо накопленной энергии. Снова можно видеть, что градиентная катушка с преобразованным полем 606 имеет значительно меньшее рассеяние энергии, чем полностью экранированная катушка 604. Фиг. 6 и 7 иллюстрируют, что примеры магнитных градиентных катушек, описанные в материалах настоящей заявки, могут значительно уменьшить количество накопленной энергии и рассеяние, по сравнению с традиционными магнитными градиентными катушками.

Фиг. 6 и 7 ясно показывают, что активное преобразование поля вместо полного экранирования ведет к значительно более эффективной катушке, чем катушка с полным активным экранированием. Отличие в накопленной энергии приблизительно составляет 1,5 раза по всему диапазону габаритов катушки; преимущество несовершенного экранирования несколько увеличивается при уменьшении внешнего радиуса катушки. Фигура 3 показывает, что возможно уменьшить диаметр магнита примерно на 100 мм, пока накопленная энергия проекта ослабленного градиента не достигнет уровня полностью экранированной катушки.

Рассеяние также уменьшается в 1,5 раза, путем ослабления требований к внешнему экранированию проекта катушки; отношение увеличивается, когда внешний радиус катушки уменьшается. Значения рассеяния те, которые вычислены разработчиком модели для шаблонов токов, для толщины меди 2 мм.

3.2. Магнит для частично экранирующих градиентов

Во всех последующих имитациях, внутренний радиус катушки был установлен равным 443 мм, и конфигурация катушки оставалась неизменной. Магнит, использованный в этих имитациях, показан на Фиг. 8. Это классическая 6+2 конфигурация с хорошей

однородностью внутри деформированного эллипсоида, распространяющегося на 430 мм в поперечном направлении и на 360 мм в направлении оси.

Фиг. 8 показывает контуры магнитного поля 800 в модели магнита, заданные сверхпроводящими катушками 108. Фиг. 8 показывает основное поле магнита с радиусом внутренней катушки 443 мм, контуры равны 3, 10, 30 и 100 мкТл. Имитации градиента показали, что точное расположение сверхпроводящих секций не имеет значительного эффекта на осуществимость проектов градиента, использующих пустое пространство между катушками. Для успеха способа более важна форма магнитных обмоток; лучшие проекты градиента получаются, когда магнитные обмотки имеют почти квадратные поперечные блоки (кроме концевых катушек, которые могут иметь большое соотношение сторон).

3.3. Градиентные катушки с более широким тоннелем внутри магнита с маленьким тоннелем

Ряд градиентных катушек был имитирован с увеличением внутреннего радиуса и с постоянным внешним радиусом 415 мм. Наименьшая из этих катушек соответствует тоннелю для пациента 600 мм, наибольшая была бы почти достаточно большой для системы с широким тоннелем. Для сравнения, эквивалентные градиенты с полным активным экранированием были также имитированы (с внешним радиусом 415 мм). Подобно тому, что наблюдалось ранее, потенциальное преимущество активного преобразования поля увеличивается, когда градиентная катушка сжимается.

График показывает, что даже для наибольшей катушки в ряду, эффективность катушки была бы подобна традиционным проектам. Предсказываемое рассеяние выше, но по-прежнему было бы на приемлемом уровне. Фиг. 9 и Фиг. 10 также содержат несколько точек для катушек с внешним радиусом 425 мм. Поднесение внешней катушки близко к магниту только немного улучшает накопленную энергию, но имеет значительный эффект на рассеяние.

Фиг. 9 и 10 показывают результаты некоторых имитаций для ряда градиентных катушек, которые были имитированы с возрастанием внутреннего радиуса и с постоянным внешним радиусом 415 мм. Фиг. 9 показывает накопленную энергию 602 в зависимости от внутреннего радиуса 900. Внутренний радиус задан в метрах и накопленная энергия 602 - в произвольных единицах. Фиг. 10 показывает рассеяние в зависимости от внутреннего радиуса. Внутренний радиус снова помечен 900 и задан в метрах, а рассеяние 702 задано в произвольных единицах. Эти диаграммы показаны для постоянного внешнего радиуса 902 в 415 мм и также показаны в нескольких случаях для внешнего радиуса 425 мм также. Кривые, помеченные 906, показывают результат для полного активного экранирования. Точка, помеченная 908, показывает внутреннюю катушку с углублением. Фиг. 9 показывает накопленную энергию частично и полностью экранированной градиентной катушки в зависимости от внутреннего радиуса, для внешнего радиуса 415 (425) мм и магнита радиуса 443 мм. Точка: внутренняя катушка с углублением, 360/380 мм, ВР (внешний радиус) 425 мм, длина углубления 600 мм.

Фиг. 10 показывает Рассеяние в частично и полностью экранированной градиентной катушке в зависимости от внутреннего радиуса, такими же геометрическими параметрами как на Фиг. 9.

Во всех имитациях предсказанное рассеяние в секциях основного магнита оставалось ниже 0,5 Вт для 1 мм холодной меди. Предсказанное рассеяние в магните менялось незначительно, когда внешний радиус градиентной системы увеличивался.

3.4. Шаблоны поля и проводников

Типичный пример внешнего поля частично экранированной катушки показан на

Фигуре 2. Поле хорошо ограничено в областях катушек основного магнита и расширяется наружу в пространство между катушками. Фиг. 11 ниже, это другая визуализация такой же геометрии катушки и данных поля, после дискретизации на проводники в 250 ампер. В наклонной плоскости через ось z системы поле также мало у магнитных катушек и намного больше между. Здесь поле также имеет азимутальную составляющую; поток частично переносится через плоскость $z=0$, частично через плоскость $x=0$. Важным последствием азимутально ориентированного обратного поля является то, что радиозащитный экран не должен принимать форму замкнутых контуров, когда один раз проходит вокруг системы через тоннель контура - конец выступа 1 - внешняя свертка - конец выступа 2. Это требование также сохраняется для внутренней проводки внутри холодной массы.

Фиг. 11 показывает визуализацию геометрии катушки, как было показанного на Фиг. 5.

На Фиг. 11, внутренний радиус Градиента равен 370 мм, внешний радиус равен 425 мм, внутренний радиус магнита 443 мм.

Плоские шаблоны проводников соответствующие этой катушке показаны на Фиг. 12 и 13. Даже с очень маленьким числом витков внешнее поле точно следует контуру, найденному в распределении постоянного тока. С выбором этого рабочего тока, индуктивность катушки будет 155 микроГенри.

Фиг. 12 показывает шаблон проводников 1200 проводящего слоя 500. Проводящий слой 500 является цилиндрическим, поэтому Фиг. 12 показывает шаблон проводников 1200 на плоскости. Подобным образом, Фиг. 13 показывает шаблон проводников 1300 внешнего проводящего слоя 502.

3.5. Вариант первичной катушки с углублением

Дальнейшее повышение внутреннего диаметра катушки вероятно сделало бы рассеяние выше желаемого. Один способ дальнейшего увеличения тоннеля для пациента заключался бы в создании углубления в первичной катушке и помещении РЧ катушки в это углубление. Фиг. 9 и Фиг. 10 также содержит одну точку на графике для градиентной катушки с внутренним углублением, которое бы позволило дальнейшее увеличение пространства в тоннеле для пациента. Углубление имело глубину 20 мм и общую длину 600 мм (позволяя вместить длинную и хорошего качества РЧ катушку). В общем, концепция активного преобразования поля может быть объединена со всеми другими способами улучшения градиентной эффективности (включая нецилиндрическое и/или асимметричное поперечное сечение внутреннего тоннеля).

3.6. Z-градиентная катушка

Z-градиентная катушка в целом гораздо более эффективна, чем поперечные катушки, поэтому менее актуально пытаться оптимизировать ее эффективность. Несколько пробных имитаций было сделано для того, чтобы увидеть, является ли неполное экранирование также эффективным для этого канала. Ослабление внешнего поля для этих катушек должно быть сделано осторожно, потому что z-градиент может стать индуктивно связанным с секциями основного магнита. Если градиентная катушка влияет на результирующий поток любой из секций основного магнита, это может привести к большим индуцированным напряжениям, если переключить градиентную катушку. Поэтому, в дополнение к минимизации поля в обмотках основного магнита, z-градиентная система с экранированием ослабленного внешнего поля также должна удовлетворять требованиям о том, что взаимная индуктивность с каждой секцией магнита должна быть близка к нулю. Частично экранированная z-градиентная катушка была сформирована на той же петле, что и поперечная катушка с внутренним радиусом

370 мм, внешним радиусом 425 мм и радиусом магнита 435 мм. Итоговая катушка показана на Фигуре 10. Контурная линия показывает модуль поля, с размером шага конура 0,1 мТл (@ 10 мТл/м). Эта катушка имела бы накопленную энергию 2,8 Дж (90 микроГенри при 10мТл/м@250А). Предсказанное рассеяние в магните меньше чем 100 мВт. Это достаточно хорошо, чтобы быть уверенным, что подобающий z-градиент может быть включен в концепцию, без привнесения любых дополнительных технологических трудностей.

4. Обстоятельства практической реализации

Основные отличия будут возникать в сверхпроводящих магнитах и во взаимодействии между магнитом и градиентной катушкой. Для облегчения выполнения концепции работы, секции магнита предпочтительно сделать короткими в направлении оси z, предоставляя максимум свободного пространства посередине. Опорная конструкция магнита предпочтительно не поддерживает вихревые токи. Так как остаточное внешнее градиентное поле будет всегда, обмотки магнита нуждаются в медной или алюминиевой прокладке (которая вероятно все равно будет для того, чтобы оставить секции магнита при рабочей температуре). Проводящие прокладки предпочтительно должны полностью закрывать катушки.

Радиозащитный экран и труба тоннеля магнита должны быть сделаны так, что они не поддерживает вихревые токи. Для тоннеля комнатной температуры, это может быть сделано с использованием доступной технологии: все магниты, которые у нас были до 1989, имели усиленные стекловолокном пластиковые каналы трубок. Одним вариантом для этой стенки было бы использование внешнего цилиндра градиентной катушки как внутренней стенки внешнего вакуумного контейнера. Параметрический анализ предыдущей главы показывает, что ухудшение для отдельных градиентных катушек внутри трубы тоннеля с более толстыми стенками не критическое. Полезный побочный эффект непроводящего тоннеля магнита в том, что вихревые токи не могут быть индуцированы в них. Это, вероятно, уменьшит акустические помехи, формируемые системой.

Радиозащитный экран со щелями с хорошей теплопроводностью в направлении оси, но с высоким термическим и электрическим сопротивлением в азимутальном направлении, мог бы быть сделан из двух шаблонов со щелями из пластин толщиной 2-3 мм, склеенных вместе таким образом, что проводящие элементы предпочтительно ориентированы в направлении оси. Проводящие полосы затем либо присоединены поочередно к одному концу выступа, либо присоединены оба, когда они прерываются где-то по длине.

Несмотря на то, что изобретение было подробно проиллюстрировано и описано на чертежах и в предшествующем описании, такие иллюстрация и описание должны считаться иллюстративными или примерными, а не ограничительными; изобретение не ограничено раскрытыми вариантами осуществления.

Другие варианты в отношении раскрытых вариантов осуществления могут быть осмыслены и реализованы специалистами в данной области техники при осуществлении заявленного изобретения на практике, по изучению чертежей, раскрытия и прилагаемой формулы изобретения. В формуле изобретения, слово «содержащий» не исключает другие элементы или этапы, а единственное число не исключает множественности. Одиночный процессор или другой блок может выполнять функции нескольких элементов, изложенных в формуле изобретения. Простое обстоятельство, что определенные критерии перечисляются в обоюдно разных зависимых пунктах формулы изобретения, не служит признаком того, что сочетание этих критериев не может

использоваться с выгодой. Компьютерная программа может храниться/
распространяться на подходящем носителе, таком как оптический запоминающий
носитель или твердотельный носитель, поставляемый вместе с или в качестве части
других аппаратных средств, но также может распространяться в других формах, таких
5 как через сеть Интернет или другие системы проводной или беспроводной дальней
связи. Никакие символы ссылок в формуле изобретения не должны истолковываться
в качестве ограничивающих объем.

СПИСОК НОМЕРОВ ССЫЛОК

- 100 система магнитно-резонансной визуализации
- 10 102 магнит
- 104 тоннель магнита
- 106 криостат
- 108 сверхпроводящая катушка
- 110 магнитная градиентная катушка
- 15 112 источник питания магнитной градиентной катушки
- 114 зона визуализации
- 116 радиочастотная катушка
- 118 радиочастотный приемопередатчик
- 120 субъект
- 20 122 опора субъекта
- 130 цилиндрическая ось симметрии
- 132 длина, параллельная оси 130
- 134 внешняя поверхность магнитной градиентной катушки
- 150 компьютерная система
- 25 152 аппаратный интерфейс
- 154 процессор
- 156 пользовательский интерфейс
- 158 компьютерное запоминающее устройство
- 160 компьютерная память
- 30 162 последовательность импульсов
- 164 данные магнитного резонанса
- 166 магнитно-резонансное изображение
- 168 модуль управления
- 170 модуль восстановления изображения
- 35 200 система магнитно-резонансной визуализации
- 202 вакуум
- 204 радиозащитный экран
- 206 теплый тоннель
- 208 внутренний цилиндр радиозащитного экрана
- 40 400 петля, задающая градиентную катушку
- 402 петля, задающая сверхпроводящую катушку
- 500 внутренний проводящий слой
- 502 внешний проводящий слой
- 504 расширение магнитного поля
- 45 600 внешний радиус катушек [м]
- 602 накопленная энергия [произвольные единицы]
- 604 полностью экранированная градиентная катушка
- 606 экран, которому придана форма для уклонения от сверхпроводящих катушек

702 рассеяние энергии [произвольные единицы]

800 контуры магнитного поля

900 внутренний радиус [м]

1200 шаблон проводников

5 1300 шаблон проводников

(57) Формула изобретения

1. Магнитный узел (102, 110) для системы магнитно-резонансной визуализации (100, 200), содержащий

10 - магнит, причем магнит представляет собой сверхпроводящий магнит с несколькими сверхпроводящими катушками, и причем имеется сверхпроводящая катушка, выбранная из нескольких сверхпроводящих катушек, центрированных соосно около каждой области ослабленного поля, и

15 - магнитную градиентную катушку с активным экранированием (110), выполненную с возможностью создания магнитного поля (504), причем магнитное поле имеет цилиндрическую ось симметрии (130), причем градиентная катушка имеет длину (132), параллельную цилиндрической оси симметрии, причем магнитная градиентная катушка имеет внешнюю поверхность (134), магнитное поле содержит внешнее магнитное поле снаружи от внешней поверхности, и причем внешнее поле имеет по меньшей мере четыре
20 области ослабленного поля (136, 138, 140, 142) вдоль длины, где модуль магнитного поля меньше среднего модуля магнитного поля вдоль длины.

2. Магнитный узел по п.1, в котором линейный размер каждой области ослабленного поля, при измерении вдоль длины, составляет по меньшей мере 10% от расстояния между двумя соседними областями ослабленного поля.

25 3. Магнитный узел по п.1, в котором выполняется любое из последующего: модуль внешнего поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 2,5 раза меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины,

модуль внешнего магнитного поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 5 раз меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины,

30 модуль внешнего поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 10 раз меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины, и

модуль внешнего поля внутри любой области ослабленного поля по меньшей мере в 20 раз меньше, чем средний модуль магнитного поля вдоль длины.

35 4. Магнитный узел по п.1, в котором градиентная катушка имеет внутренний проводящий слой (500) и внешний проводящий слой (502), внутренний проводящий слой содержит первый набор отдельных токовых контуров (1200), соединенных последовательно, и внешний проводящий слой содержит второй набор отдельных токовых контуров (1300), соединенных последовательно, и причем первый набор соединен последовательно со вторым набором.

40 5. Магнитный узел по любому из предшествующих пунктов, в котором градиентная катушка содержит три ортогональные градиентные катушки, в котором области ослабленного поля ортогональных градиентных катушек совпадают и соответствуют типичным положениям по меньшей мере некоторых катушек сверхпроводящего магнита.

45 6. Магнитный узел по п. 1, в котором магнит содержит трубу (206) теплого тоннеля и радиозащитный экран (204), и в котором радиозащитный экран содержит внутренний цилиндр (208) радиозащитного экрана между трубкой теплого тоннеля и несколькими сверхпроводящими катушками.

7. Магнитный узел по п.6, в котором труба теплого тоннеля и внутренний цилиндр

радиозащитного экрана не проводят электричество или имеют большее электрическое сопротивление в азимутальном направлении, чем в направлении оси цилиндра, и/или в котором внутренний цилиндр сформирован из диэлектрика.

8. Магнитный узел по п.7, в котором внутренний цилиндр радиозащитного экрана сформирован из проводящего материала с щелями, выполненными так, чтобы блокировать вихревые токи, создаваемые внешним магнитным полем магнитной градиентной катушки, или внутренний цилиндр радиозащитного экрана сформирован из диэлектрика.

9. Магнитный узел по любому из пп.6-8, в котором труба теплового тоннеля содержит магнитную градиентную катушку.

10. Магнитный узел по п.9, в котором магнит является бескристаллическим магнитом.

11. Магнитный узел по п.1, в котором магнитная градиентная катушка выполнена так, чтобы создавать такое внешнее магнитное поле, что оно расширяется (504) между каждой сверхпроводящей катушкой.

12. Система магнитно-резонансной визуализации, содержащая магнитный узел по любому из пп.1-11.

13. Магнитная градиентная катушка (110) для системы магнитно-резонансной визуализации (100, 200), причем магнитная градиентная катушка активно экранирована, причем магнитная градиентная катушка выполнена с возможностью создания магнитного поля (504), магнитное поле имеет цилиндрическую ось симметрии (130), градиентная катушка имеет длину (132), параллельную цилиндрической оси симметрии, магнитная градиентная катушка имеет внешнюю поверхность (134), причем магнитное поле содержит внешнее магнитное поле снаружи от внешней поверхности, и причем внешнее поле имеет по меньшей мере четыре области ослабленного поля (136, 138, 140, 142) вдоль длины, где модуль магнитного поля меньше среднего модуля магнитного поля вдоль длины, причем линейный размер каждой области ослабленного поля, при измерении вдоль длины, составляет по меньшей мере 10% от расстояния между двумя соседними областями ослабленного поля.

14. Способ проектирования магнитной градиентной катушки (110) для системы магнитно-резонансной визуализации (100, 200), используя программное обеспечение магнитного проектирования, содержащий этапы, на которых:

А) задают (300) цилиндрические поверхности, соответствующие внутреннему проводящему слою (502) и внешнему проводящему слою (504) градиентной катушки и необязательно задают проводящие выступающие области, соединяющие внутренний проводящий слой и внешний проводящий слой;

В) задают (302) ограничения, обеспечивающие поле магнитного градиента с предопределенной линейностью в объеме (114) визуализации внутри градиентной катушки, причем магнитная градиентная катушка имеет внутреннюю поверхность (134);

С) задают (304) ограничения, ограничивающие внешнее магнитное поле, окружающее внешнюю поверхность, так, что имеется по меньшей мере четыре области ослабленного поля (136, 138, 140, 142), соответствующие местоположению сверхпроводящих катушек сверхпроводящего магнита,

и/или

задают (304) поверхности, действующие как пассивные проводящие кольца в местоположениях областей ослабленного поля и задающие ограничения на ток, индуцированный в этих кольцах, или рассеяние, вызванное этими индуцированными токами, причем этапы А, В и С задают задачу оптимизации при нахождении

распределения тока во внутреннем проводящем слое и внешнем проводящем слое;

D) решают (306) задачу оптимизации для вычисления функции непрерывного потока, причем функция непрерывного потока описывает решение задачи оптимизации; и

5 E) преобразовывают (308) функцию непрерывного потока, полученную как результат оптимизации в шаблон отдельных токовых контуров (1200, 1300), причем соединяют эти отдельные токовые контуры последовательно для задания проекта градиентной катушки.

15. Способ по п.14, в котором способ дополнительно содержит производство градиентной катушки согласно проекту градиентной катушки.

10

15

20

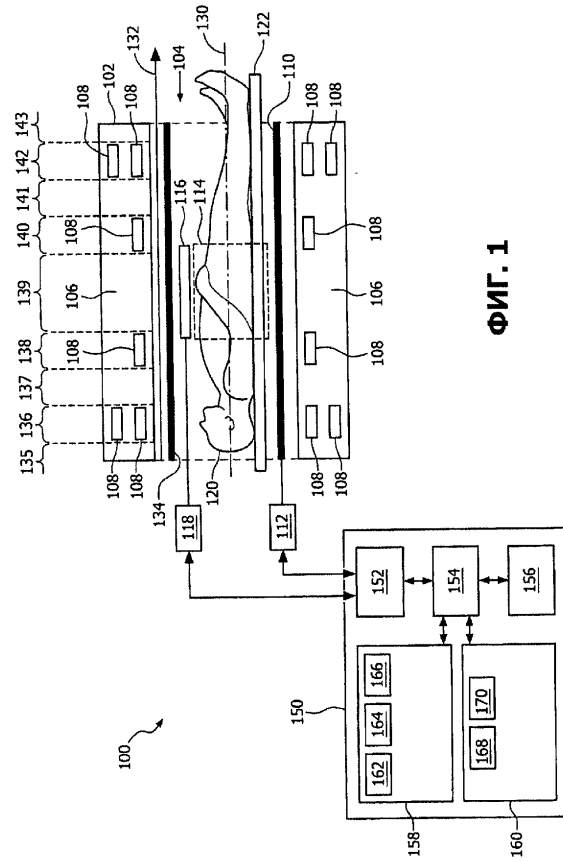
25

30

35

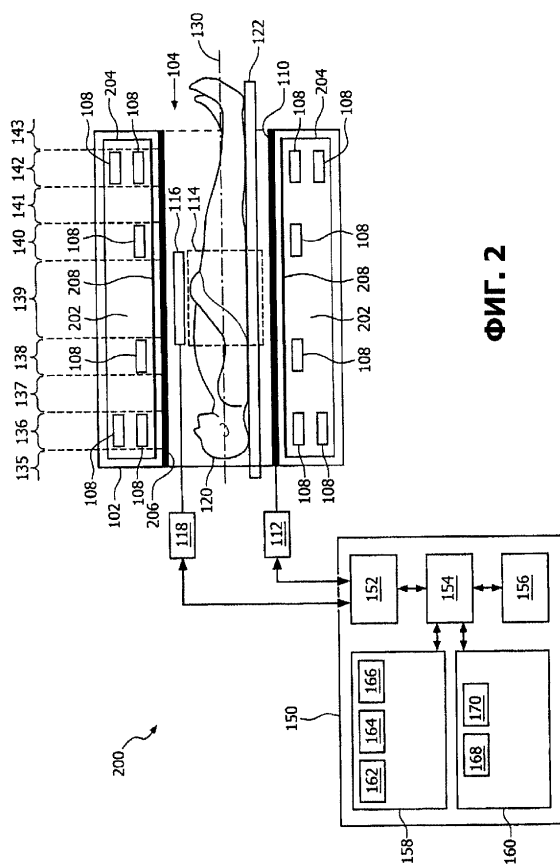
40

45



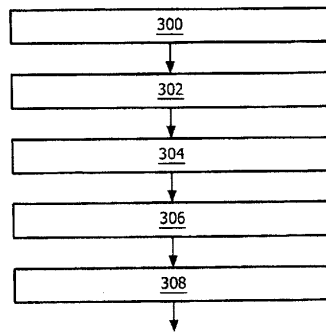
ФИГ. 1

2/11

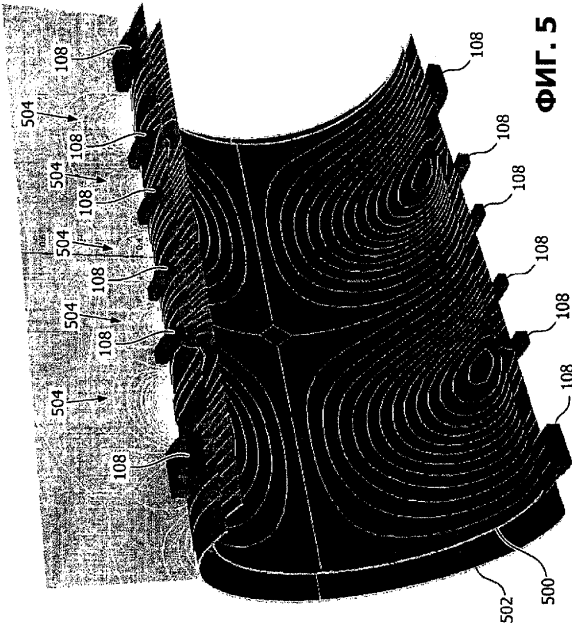


ФИГ. 2

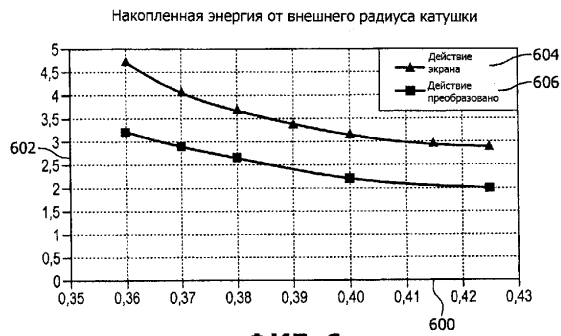
3/11



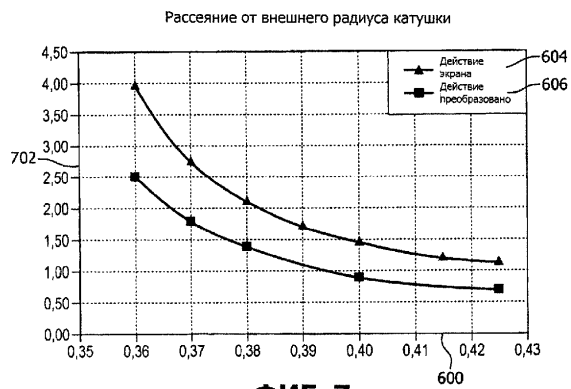
ФИГ. 3



6/11

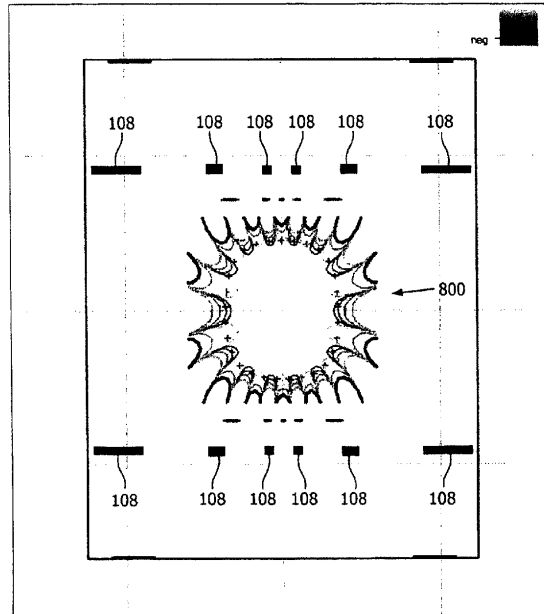


ФИГ. 6



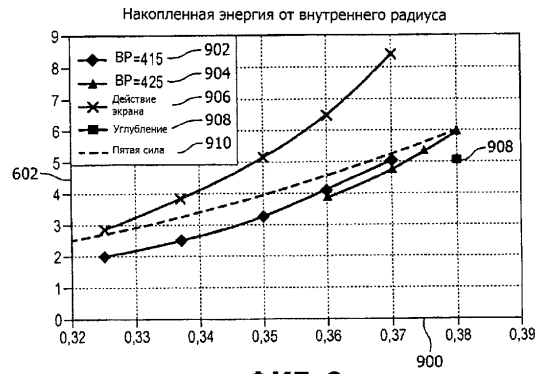
ФИГ. 7

7/11

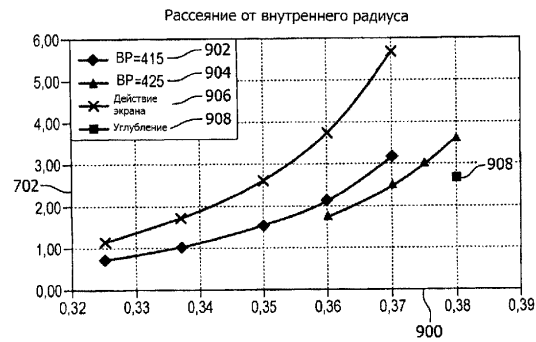


ФИГ. 8

8/11

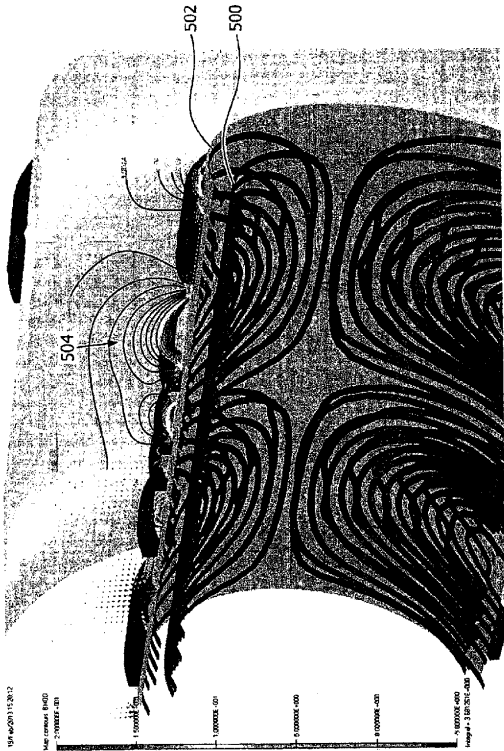


ФИГ. 9



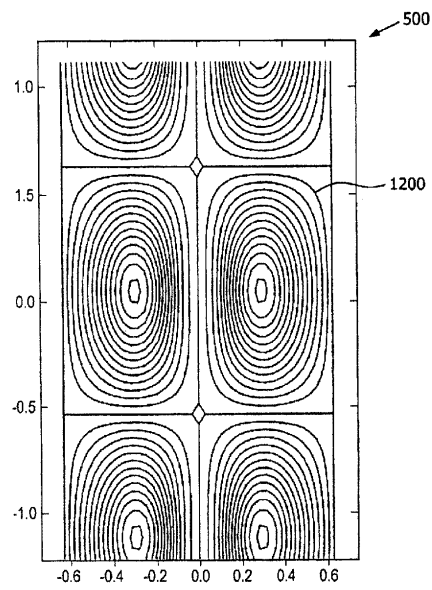
ФИГ. 10

9/11



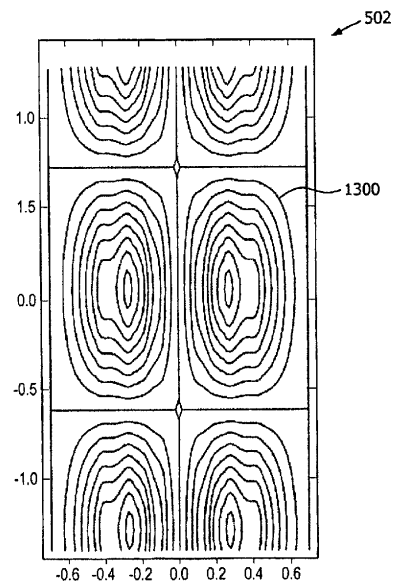
ФИГ. 11

10/11



ФИГ. 12

11/11



ФИГ. 13