

# Магнитные и градиентные системы МРТ

**Лекторы:**

Карлос Кабаль Мирабаль

**Ассистент:**

Анна Казначеева

**Язык:**

Русский

**Трудоемкость:**

3 з.е.

**Форма контроля:**

Экзамен/ Exam

**Образовательная программа:**

Беспроводные технологии (магистратура)

3 семестр

Лекции (ак.час)*	Практические занятия (ак.час)	Лабораторные занятия (ак.час)
18		
*1 академический час = 45 минутам		

В рамках курса слушатели познакомятся с двумя подсистемами магнитно-резонансного томографа: магнитной и градиентной. Будет рассмотрено устройство данных подсистем и их связь с радиочастотной подсистемой. Будут описаны основные принципы характеристики данных подсистем и решения обратных задач. Особенное внимание уделено влиянию их основных характеристик на качество изображения.

Данный курс является специализированным и предназначен для магистров с специализацией в области магнитно-резонансной томографии.

Within the framework of this course, students will learn about two subsystems of a magnetic resonance scanner: the magnetic one and the gradient one. We will consider the design of these subsystems and their connection with the radio frequency subsystem. We will also describe the basic principles for the characterization of these subsystems and for solving inverse problems. We pay a particular attention to the influence of their main characteristics on the image quality.

This is a specialized course intended for Master's students who major in magnetic resonance imaging.

## Содержание курса

### 3 семестр

#### Магнитные и градиентные системы МРТ

##### Структура курса

Разделы	Лекции (ак.ч.)
<b>Тема 1. Введение. Магнитно-резонансная физика и оборудование.</b>	
<p>Многообразие МР-экспериментов: МР-спектроскопия, МР-релаксация, МР-томография. Разнообразие объектов и их характеристики. Взаимосвязь между физикой, аппаратурой и характеристиками объекта в МР-экспериментах. Общие требования. Общие и традиционные характеристики оборудования МР. Поле и частотный диапазон. Отличия. Общая блок-схема статического магнитного поля для МР (<math>B_0</math>). Чувствительность. Отношение сигнал/шум. Пространственное и спектральное разрешение. Влияние статического магнитного поля на процесс релаксации. Ларморовская частота как носитель МР-информации. Корректировка внешнего статического магнитного поля. Общие характеристики радиочастотного магнитного поля <math>B_1</math> для МР-экспериментов. Эффективное радиочастотное поле. Насыщение. Физическая связь между РЧ-полем и электромагнитными и молекулярными характеристиками объекта. Импульсное магнитное поле для кодирования, предполяризации, измерений диффузии, экспериментов с циклированием поля и коррекции неоднородности <math>B_1</math> и <math>B_0</math>. Требования к импульсным последовательностям. Катушки и электроника. Геометрическая симметрия, распределение и его влияние на электромагнитные характеристики.</p>	2
<b>Тема 2. Статическое однородное внешнее магнитное поле.</b>	
<p>Общая физика и технологические характеристики МР-магнита. Типы магнитов. Постоянные магниты. Электромагниты с воздушным сердечником. Резистивные магниты с железным сердечником. Сверхпроводящие магниты. Магниты для экспериментов МР-спектроскопии высокого разрешения. Магнит для МРТ-обследования человека. Магниты для научных исследований с животными. Прямая и обратная задача электромагнетизма. Повторение уравнений Максвелла, Лапласа и Био-Савара. Магнитное поле токовой петли. Магнитное поле для набора токовых петель. Однородность. Сферические гармоники. Зональные и тессеральные гармоники. Полиномы Лежандра. Расчет магнитных систем. Различные методы характеризации однородности. Магнитное экранирование. Сверхпроводящий магнит. Характеристики проводов и материала. Снабжение сверхпроводящего магнита энергией. Напряжение в магните. Требования к проводке. Квенч (внезапная утрата магнитом сверхпроводимости) и защита от него. Характеристики криостата. Перемещение и установка магнита. Безопасность магнита. Международные правила.</p>	2
<b>Тема 3. Импульсное магнитное поле.</b>	
<p>3.1. Импульсные последовательности для 1D, 2D и 3D изображений. Общие требования к градиентной системе. Историческая эволюция градиентных систем и методов расчета. Форма лепестков градиентов. Градиент для сбора данных под углом. Ортогональность. Нежелательные (побочные) градиенты. Градиенты частотного и фазового кодирования. Общие и отличительные характеристики. Градиент выбора среза. Градиент перефазирования среза.</p>	2
<p>3.2. Градиенты, обеспечивающие чувствительность к движению: диффузии, перфузии, потоку. Корректирующие градиенты. Crusher-градиенты. Обнуление момента градиента. Очищающие градиенты. Классические и базовые конфигурации градиентных катушек. Классические методы расчета градиентной катушки. Конфигурация катушек Максвелла. Конфигурация Голея. Методы Био-Савара. Анализ с использованием сферических гармоник. Зональные и тессеральные гармоники. Улучшение конфигурации Голея. Основы теории целевого поля. Методы плотности тока. Функция целевого поля. Фактор, который необходимо включить в функцию целевого поля. Реальная конфигурация катушек. Эффективность, однородность, линейность, критерии качества градиентных катушек. Вихревой ток. Вихретоковая зависимость материалов. Методы компенсации вихревых токов. Силы, связанные с системой градиентных импульсов. Электрическое поле, создаваемое градиентными импульсами. Зависимость электрического поля от электромагнитных характеристик объекта. Диссипация энергии. Система обмотки. Мониторинг температуры в системе градиентных катушек.</p>	2
<p>3.3. Влияние индуктивности катушек. Методы управления временем нарастания градиентного импульса. Зависимость напряженности поля и RLC характеристик. Влияние кабелей, трубок, соединений. Согласование градиентной катушки с усилителем мощности. Требования к усилителю мощности и его характеристики. Характеристики помещения. Фильтрующая пластина. Система с постоянной интенсивностью градиента. Односторонний ЯМР. Нелинейная градиентная система. Patloc (метод параллельного сбора данных с использованием локализованных градиентов). Пространственное кодирование и массив РЧ-катушек. Характеризация и контроль качества градиентной системы. Различные методы характеризации градиентной системы в зависимости от этапа проектирования, формы и параметров импульса. Фурье-анализ. Анализ линейности и ортогональности. Электронные и аппаратные методы. Методы томографии. Безопасность и защита в градиентной системе. Международные правила.</p>	2
<b>Тема 4. Технология шиммирования. (2 часа)</b>	

<p>Причины неоднородности магнитного поля. Анализ с использованием сферических гармоник. Характеризация и действия по корректировке. Пассивное и активное шиммирование. Возможности и ограничения. Неоднородность восприимчивости магнитного поля. Зависимость от геометрии, температуры, времени, импульсной последовательности, картирования ЯМР. Методы томографии. Эффективность шиммирования. Динамическое шиммирование. Компенсация вихревых токов. Взаимодействие между градиентными катушками, шиммирующими катушками и основным магнитом. Методы уменьшения взаимодействия.</p>	2
<p><b>Тема 5. Радиочастотное магнитное поле (6 часов)</b></p>	
<p>5.1. Форма радиочастотного импульса. Временные и частотные области. Прямоугольные импульсы. SINC-импульсы. Импульсы SLR (Шиннара - Ле Ру). Импульсы переменной частоты. Импульсы возбуждения и перефокусировки. Инвертирующие импульсы. Композитные РЧ-импульсы. Импульсы передачи намагничивания. Многомерные импульсы (2D и 3D). Наклонные импульсы. Импульсы пространственного насыщения. Пространственные спектральные импульсы. Маркирующие импульсы. SPANMM и DANTE. Адиабатические РЧ-импульсы. Импульсы возбуждения, перефокусировки и инвертирующие импульсы. Функции модуляции. Характеристики и функция РЧ магнитного поля в МР-экспериментах. Общие цели при проектировании РЧ катушек, квазистатическое электромагнитное условие. Радиочастотное магнитное и электрическое поле, создаваемые одним контуром. Принцип взаимности. Фаза в радиочастотном магнитном поле. Линейная и круговая поляризация радиочастотного поля. Квадратурные катушки для передачи и приема. Генерация катушками однородного радиочастотного поля: катушка типа "птичья клетка", открытая конфигурация и поверхностные конфигурации.</p>	2
<p>5.2. Распределение поля поверхностной катушки. Квадратурные поверхностные катушки. Функции конденсаторов. Взаимная индуктивность и критическое перекрытие. Массивы поверхностных катушек. Критерии для проектирования катушек. Отношение сигнал/шум (ОСШ), разрешение, поле зрения (FOV), однородность поля B1. ОСШ и разрешение в зависимости от FOV. Фазовая и взвешивающая компенсация вклада вокселя в ОСШ. КПД катушек. Поверхностные катушки с двойной настройкой. Цепи поверхностных РЧ-катушек. Резонансные цепи. Цепи настройки и расстройки. Согласование, связь и развязка в режимах приема и передачи. Емкостное и индуктивное согласование. Согласование импеданса с использованием линий передачи. Характеризация поверхностных катушек. Реальные поверхностные катушки в аппарате МРТ. Соединение массива поверхностных катушек. Экспериментальное доказательство. Конфигурация объемных катушек. Методы плотности тока. Метод целевого поля. Конфигурация типа "птичья клетка". Гибридная, низкочастотная и высокочастотная конфигурация типа "птичья клетка". Эквивалентные схемы. Настройка и согласование. Катушки с двойной настройкой. Спектральный анализ. Длина катушки типа "птичья клетка". Характеристика количества петель. Влияние крайних колец. РЧ-однородность B1. Влияние конденсаторов. Взаимодействие РЧ катушек с электромагнитной ?окужающей средой. Экранирование "птичьей клетки". Влияние экранирования на однородность и интенсивность B1 и на КПД катушки. Метод изображений для улучшения однородности. Метод сеток. Карта B1. Расчет плотности B1. Случай открытых катушек. Катушка типа "птичья клетка" с двойной настройкой. Требования и возможности. Различные варианты. Критерии выбора топологии для конфигураций катушки типа "птичья клетка". Ограничения катушек типа "птичья клетка".</p>	2
<p>5.3. Поперечные электромагнитные катушки (ТЕМ). Некоторые конфигурации. Преимущества. Шиммирование РЧ-катушек в конфигурациях ТЕМ. Целевое поле и функция потока. Поверхностные катушки ТЕМ. Электронная блок-схема ТЕМ и многоканальных катушек. Карта B1 катушек ТЕМ. Карта B1 катушки типа "птичья клетка" по сравнению с катушками ТЕМ с нагрузкой и без нее. Проектирование и реализация массивов ТЕМ. Катушки ТЕМ для конечностей. Характеристики диэлектрических резонаторов. Преимущества и недостатки. Гибридные электромагнитные моды (НЕМ). Некоторые специальные катушки. РЧ катушки для модели животного. РЧ-катушки для твердотельного ЯМР. РЧ катушки-катетеры. Микро-катушки. Удельный коэффициент поглощения (SAR). Электрические свойства тканей. Общие методы расчета и моделирования. Сравнение разных конфигураций. Протоколы МРТ для снижения SAR. Радиочастотная безопасность. Международные правила. Конструкция РЧ-усилителя мощности и приемника для МРТ. Общие характеристики.</p>	2
<p><b>Topics of Magnetic Resonance Hardware</b></p>	
<p><b>Topic 1. Introduction. Magnetic Resonance Physics and hardware</b></p>	
<p>Diversity of MR experiments: MR spectroscopy, MR relaxation, MR imaging. Objects diversity and characteristics. Relationship between the Physics, hardware and object characteristics in MR experiments. General Requirements. General and common characteristics of MR equipment. Field and frequency range. Distinctions. General Block diagram of Static Magnetic field in MR (Bo). Sensibility. Signal Noise ratio. Spatial and spectral resolution. The influence of the Static Magnetic field in the relaxation process. Larmor frequency as a carrier of the MR information. Correction of the external static magnetic field. General Characteristics Radiofrequency Magnetic field B1 for the MR experiments. Effective Radio frequency field. Saturation. Physics relationship between the RF field and the electromagnetic and molecular characteristic of the object. Pulse magnetic field for codification, pre polarization, Diffusion measurements, Field cycling experiments and correction of the B1 and Bo inhomogeneity. Pulse sequences requirements. Coils and electronics. Geometric symmetry, distribution and it influence on the electromagnetic characteristics.</p>	2
<p><b>Topic 2. Static homogeneous external magnetic field</b></p>	

<p>MR magnet general physics and technological characteristics. Magnet types. Permanent magnets. Air cored Electromagnets. Iron cored resistive magnets. Superconducting magnets. Magnets for High resolution MR spectroscopy experiments. Magnet for Human MRI studies. Magnets for animal research. Direct and inverse problem of the electromagnetism. Recalling of Maxwell, Laplace and Biot Savart equations. Magnetic field of a current loop. Magnetic field for a set of currents loops. Homogeneity. Spherical harmonics. Zonal and Tesseral Harmonics. Legendre polynomials. Calculation of magnetic systems. Different methods for the homogeneity characterization. Magnet shielding. Superconducting Magnet. Wire and material characteristics. Energizing Superconducting magnet. Stress in the magnet. Wiring requirements. Quench damage and protection. Cryostat characteristics. Movement and installation of the Magnet. Safety concerning the magnet. International regulations.</p>	2
<p><b>Topic 3. Pulse Magnetic field</b></p>	
<p>3.1. 1D, 2D and 3D Images pulse sequences. General requirements for gradient system. Historical evolution of the gradient systems and calculation methods. Gradient Lobes shape. Gradient for oblique acquisitions. Orthogonality. Concomitant Gradients. Frequency and Phase Encoding Gradients.</p>	2
<p>3.2. Common and distinctions characteristics. Slice selection Gradient. Slice rephasing gradient. Motion sensitizing Gradients: Diffusion, Perfusion, Flow. Correction Gradients. Crusher gradients. Gradient Moment nulling. Spoiler gradients. Classical and basics gradient coils configurations. Classical Methods for the calculation of Gradient coil. Maxwell coils configuration. Golay configuration. Biot Savart methods. Spherical Harmonics analysis. Zonal and Tesseral harmonics. Improving the Golay Configuration. Bases of the Target field theory. Current density methods. Target Field function. Factor to be included in the Target Field function. Real coils configuration. Efficiency, Homogeneity, linearly, Figure of Merit of gradient coils. Eddy current. Eddy current dependence of the materials. Methods for Eddy current compensation. Forces associated with gradient pulses system. Electrical field generated by gradient pulses. Dependence of the electrical field on the object electromagnetic characteristics. Energy dissipation. Coiling system. Temperature monitoring in Gradient coils system.</p>	2
<p>3.3. Effects of coils inductance. Methods for driving the Rise Time of the gradient pulse. Dependence of the strength and RLC characteristics. Cables, tubes, connector's influences. Gradient coil matching to the Power amplifier. Power amplifier requirements and characteristics. Room characteristics. Filter plate. System with constant gradient intensity. Single side NMR. Nonlinear Gradient system. Patloc. Space codification and RF array of coils. Characterization and quality control of the Gradient system. Different methods to characterize the gradient system in dependence on the step of the design and Pulse shape and parameters. Fourier analysis. Linearity and orthogonality analysis. Electronics and Hardware methods. Imaging methods. Safety and protection in the Gradient system. International regulations.</p>	2
<p><b>Topic 4. Shimming technology (2 hours.).</b></p>	
<p>Causes of the magnetic field inhomogeneity. Spherical harmonic analysis. Characterization and correction actions. Passive and active shimming. Possibilities and restrictions. Magnetic field susceptibility inhomogeneity. Dependence on the geometry, Temperature, time, Pulse sequence, NMR mapping. Imaging methods. Shimming efficiency. Dynamic shimming. Eddy current compensation. Interaction between the gradient coils the shim coils and main magnet. Methods to decrease the interaction.</p>	2
<p><b>Topic 5. Radiofrequency Magnetic field (6 hours)</b></p>	
<p>5.1. Radiofrequencies pulse shape. Time and frequency domains. Rectangular pulses. SINC pulses. SLR pulses. Variable rate pulses. Excitation and refocusing pulses. Inversion pulses. Composite RF pulses. Magnetization Transfer pulses. Multidimensional pulses (2D and 3D). Ramp pulses. Spatial saturation Pulses. Spatial spectral pulses. Tagging pulses. SPANMM and DANTE. Adiabatic RF pulses. Excitation, Refocusing and inversion pulses. Modulation functions. RF magnetic field characteristics and function in MR experiments. General goals in RF coil design quasi static electromagnetic condition. RF magnetic and electric field produced by one loop. Principle of Reciprocity. Phase in RF magnetic field. Linear and circular polarizing RF field. Quadrature in transmission and reception. Coils generation homogeneous RF field: Birdcage, Open configuration and Surface configurations.</p>	2
<p>5.2. RF magnetic field characteristics and function in MR experiments. General goals in RF coil design quasi static electromagnetic condition. RF magnetic and electric field produced by one loop. Principle of Reciprocity. Phase in RF magnetic field. Linear and circular polarizing RF field. Quadrature in transmission and reception. Coils generation homogeneous RF field: Birdcage, Open configuration and Surface configurations. Surface coil's field distribution. Quadrature surface coils. Capacitors functions. Mutual inductance and critical overlapping. Arrays of surface coils. Criterion of coils design. Signal Noise Ratio, Resolution, Field of View (FOV), B1 homogeneity. SNR and resolution versus FOV. Phase and weighting compensation of the voxel contribution in the SNR. Coils efficiency. Double tuned surface coils. RF surface coils circuits. Resonance circuits. Tuning and detuning circuits. Matching, coupling and decoupling in reception and transmission regimes. Capacitance and Inductive matching. Impedance matching by transmission lines. Surface coils characterization. Real surface coils in MRI machine. Connection of surface array coils. Experimental proof.</p>	2

<p>5.3. Volume coils configuration. Current density methods. Target field approach. Birdcage configuration. Hybrid, Low pass and high pass birdcage configuration. Equivalent circuits. Tuning and matching. Double tuning coils. Spectrum analysis. Birdcage coil length. Number of loops characteristics. Ends rings effect. B1 RF homogeneity. Effect of the capacitors. RF coils interaction with Electromagnetic the surrounding. Birdcage shielding. Effect of the shielding in the B1 homogeneity, intensity and the coil efficiency. Method of images to improve the homogeneity. Mesh method. B1 map. Calculation of the B1 density. Open coils case. Double tuning birdcage coil. Requirements and possibilities. Different options. Criteria for the topology selection of the Birdcage coil configurations. Birdcage coils limitations.</p> <p>Transverse Electromagnetic coils (TEM). Some configurations. Advantages. Shimming of RF coils in the TEM configurations. Target field and stream function. Surfaces TEM. Electronic Block diagram of the TEM and multi tuning coils. B1 map of TEM coils. B1 Map Birdcage versus TEM coils load and unload. TEM arrays design and implementation. TEM coils for extremities. Dielectric resonators characteristics. Advantage and disadvantages. Hybrid electromagnetic modes (HEM).</p> <p>Specific Absorption Rate (SAR). Tissue electrical properties. Common calculation and simulation methods. Comparison between different configurations. MRI protocols to decrease the SAR. RF safety International regulations. RF power amplifier and Receiver design for MR. General characteristics.</p>	2
--	---

## Рекомендуемые ресурсы

1. R.W. Brown, Yu-Chung N. Cheng, E. Mark Haacke, M. R. Thomson, R. Venkatesan, "Magnetic Resonance Imaging Physical Principles and Sequence Design" Second edition, Willey Blackwell, 2014.
2. Z.P. Liang, P. Lauterburg "Principles of Magnetic Resonance Imaging. A signal Processing Perspective" IEEE Press, 2000.
3. C.N Chen and D.I. Hoult "Biomedical Magnetic Resonance Technology". Adam Hilger, NY, 1989.
4. M. A. Berstein, K.F. King X.J. Zhou, "Handbook of MRI Pulse sequences". Elsevier, Academic Press, 2004.
5. D. I. Hoult, "The NMR Receiver: A Description and Analysis design" Progress in NMR Spectroscopy, 1978. Vol. 12 PP. 41-77.
6. J. T. Vaughan, J. R. Griffiths "RF Coils for MRI" John Willey and Sons, 2012.
7. T. S. Ibrahim "Design of Radiofrequency Coils for MRI Applications: A computational Electromagnetic Approach "Dissertation; The Ohio University, 2003.
8. J. Mispelie, M. Lapu, A. Briguet "NMR Probeheads for Biophysical and Biomedical Experiments. Theoretical Principles and Practical Guidelines" Imperial Collage Press, 2009.
9. H. Sánchez López "Développement de méthodes de calcul des systèmes magnétiques en Imagerie par Résonance Magnétique», THESE, University Oriente and l'Universite Claude Bernard- Lyon 1, 2003.
10. A. G. Webb «Magnetic Resonance Technology» Hardware and System component design» The Royal Society of Chemistry , 2016.
11. J. Jin, « Electromagnetic Analysis and Design in MRI» CRC Press, 1999.
12. A. Kangarlu, P.M L. Robitaille, "Biological Effects and Health implications in Magnetic Resonance Imaging" Concepts in Magnetic Resonance, 2000, Vol. 12(5) p.321-359.

## Политика оценивания

### Оценочные средства дисциплины: экзамен, семинар.

Экзамен по данному курсу состоит из двух частей:

1. Письменный экзамен. Из десяти вопросов, которые студенты готовят заранее ко дню письменного экзамена, они должны выбрать 3 случайным образом.
2. Семинар – по 15 минут на студента, по научной статье, опубликованной в последние 10 лет, связанной с содержанием курса.

Окончательная оценка — взвешенная по результатам обоих мероприятий.

### Assessment form

#### Evaluative means of discipline: exam, seminar.

The course exam consists of two parts:

1. Written exam. In ten questions, that students prepare in advance on the day of the written exam, they must choose 3 at random.
  2. Workshop, of 15 minutes per student, based on a scientific paper from the last 10 years related to the content of the course.
- Final Evaluation - Weighing Both Activities.

## Тип самостоятельных заданий

### Вопросы для заключительного теста.

#### Часть 1. Напишите тест со следующими вопросами:

1. Назовите и опишите параметры, характеризующие поле  $B_0$ , и их единицы.
2. Назовите основные причины неоднородностей  $B_0$  и принцип действия шиммирования.
3. Изложите взаимосвязь между физическими параметрами и технологическими параметрами, которые необходимо учитывать при проектировании градиентной катушки.
4. Перечислите все функции градиентного импульса и опишите 3 из этих функций. Изложите действие градиента на систему спинов.
5. Опишите взаимодействие между  $B_0$ , градиентным импульсом и РЧ полями. Как можно компенсировать эти взаимодействия или избежать их?

#### Часть 2 Презентация и обсуждение научной работы, относящейся к одной из следующих тем:

1. Проектирование основного магнитного поля  $B_0$ .
2. Расчет основного магнитного поля  $B_0$ .

3. Характеризация и корректировка  $B_0$ .
4. Расчет градиентной катушки.
5. Проектирование градиентной катушки.
6. Характеристика градиента.
7. Взаимодействие между  $B_0$ , градиентным импульсом и РЧ полями
8. Технология шиммирования, процедура.

### **Final Test Questions.**

#### **Part 1 Write test with the following questions:**

1. Mention and describe the parameters and their units which characterize the  $B_0$  field.
2. Discuss the principal causes of the  $B_0$  inhomogeneities and how the Shimming process works.
3. Discuss the relationship between physics parameters and technological parameters to be taking account in the Gradient coil design.
4. Mention each of the Gradient pulse functions and describe 3 of those functions. Discuss the action of the Gradient over the spin system.
5. Discuss the interaction between  $B_0$ , Gradient Pulse and RF fields. How these interactions can be compensated or avoided?

#### **Part 2 Presentation and discussion of a scientific paper related to one of the following themes:**

1. Design of the main magnetic field  $B_0$ .
2. Calculation of the main magnetic field  $B_0$ .
3.  $B_0$  characterization and correction.
4. Gradient coil calculation.
5. Gradient coil design.
6. Gradient Characterization.
7. Interaction between  $B_0$ , Gradient Pulse and RF fields
8. Shimming Technology, procedure.