

Лабораторна робота № 3.

Реконструкція зображень у магніто-резонансній томографії.

Мета роботи: ознайомитись з принципами магнітнорезонансної Фур'є томографії і основними методами реконструкції.

Загальні відомості

Магнітнорезонансна томографія — один з безпечних для людського організму методів інтроскопії, який дозволяє одержувати зображення довільного перерізу будь-якого внутрішнього органу з метою діагностики його стану. Завдяки цьому методу можна одержати велику кількість діагностичної інформації (густину розподілу магнітних моментів, локальні значення часу поздовжньої і поперечної релаксації та інших).

Фізичні основи ЯМР томографії

При наявності зовнішнього магнітного поля локальна намагніченість у системі частинок, що мають ненульові власні магнітний та механічний моменти, може проявляти резонансний характер, який проявляється в поглинанні електромагнітного випромінювання на певній частоті. Прикладом такої системи частинок можуть бути ядра деяких атомів, наприклад, атомів водню в організмі людини. Тому відповідний резонанс називається ядерним магнітним резонансом (ЯМР). Як показала практика поведінка подібної системи (у випадку, коли частинки слабо взаємодіють одна з одною), кількісно добре описується за допомогою класичної теорії. Основними рівняннями при цьому виступають феноменологічні рівняння Блоха, які виражають залежність локальної намагніченості речовини $\vec{M}(\vec{r}, t)$ в заданій точці простору та в заданий момент часу від параметрів зовнішнього магнітного поля $\vec{H}(\vec{r}, t)$ та параметрів речовини $T_1(\vec{r}), T_2(\vec{r}), M_0(\vec{r})$.

$$\begin{cases} \frac{dM_z}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{H})_z + \frac{M_0 - M_z}{T_1} \\ \frac{dM_{x,y}}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{H})_{x,y} - \frac{M_{x,y}}{T_2} \end{cases} \quad (1)$$

де B_0 — стале магнітне поле направлене вздовж осі z , M_0 — рівноважне значення намагніченості, T_1 — час спін-граткової (поздовжньої) релаксації, T_2 — час спін-спінової (поперечної) релаксації, γ — гіромагнітне відношення.

Іншими словами: для кожної частинки, що має магнітний момент, може рухатись і знаходитись в магнітному полі в стані рівноваги цей

магнітний момент спрямований паралельно до зовнішнього магнітного поля. При відхиленні від рівноважного напрямку локальна намагніченість повинна прецесувати навколо напрямку магнітного поля з певною частотою, яка залежить від значення магнітного поля. Радіочастотне збудження на частоті прецесії призводить до відхилення намагніченості від рівноважного напрямку. Час T_1 характеризує втрати енергії спінами, що прецесують, а час T_2 — визначається впливом частинок одна на одну, а також неоднорідністю поля..

Універсальний квантовий опис вимагає складніших обчислень і використовується при незастосовності класичної теорії.

У тих випадках коли, для об'єкту справедливі рівняння (1) існує можливість виміряти розподіл концентрації магнітних моментів та розподіл часів релаксації у даному об'єкті. Для цього об'єкт поміщується в сильне стале магнітне поле і збуджується зовнішнім радіочастотним випромінюванням, після чого накладається так зване градієнтне поле \vec{H}_G , що залежить від просторових координат x, y, z :

$$\vec{H}_G = \vec{i}G_x x + \vec{j}G_y y + \vec{k}G_z z$$

Прецесія спінів зразку під дією прикладених магнітних полів призводить до появи змінного магнітного поля біля зразку (спадання вільної індукції), яке можна легко зареєструвати. Розв'язок системи (1) при нехтуванні релаксацією дає сигнал спадання вільної індукції (2).

$$S(k_x, k_y, k_z) = \iiint \rho(x, y, z) \exp[2\pi i(k_x x + k_y y + k_z z)] dx dy dz \quad (2)$$

де $k_{x,y,z} = (2\pi)^{-1} \gamma G_{x,y,z} t_{x,y,z}$, звідки видно, що спінова густина ρ пов'язана з сигналом спадання вільної індукції (СВІ) за допомогою перетворення Фур'є. Для відновлення ρ треба мати повний набір даних для S , при всіх k . Реально отримується не неперервний, а дискретний набір даних СВІ за допомогою АЦП. Рівняння (2) є основою Фур'є томографії ядерного магнітного резонансу.

За допомогою ЯМР можна отримувати тривимірний розподіл ρ , однак це пов'язано з великими затратами часу та машинних ресурсів на накопичення, обробку та зберігання даних, тому на практиці як правило обмежуються двовимірними зображеннями.

Для отримання двовимірних зображень (зрізів) використовують селективне збудження спінів в потрібній площині, тобто накладають сталий градієнт магнітного поля в певному напрямку, при цьому в будь-якій площині, перпендикулярній до цього градієнту стале магнітне поле, а отже і резонансна частота ЯМР будуть однаковими, але для різних таких площин - різними. Якщо тепер прикласти РЧ сигнал з потрібною частотою, то можна збудити тільки спіни в потрібній площині. Для кодування координат в площині застосовують ортогональні сталі градієнти магнітного поля, що паралельні цій площині.

При цьому для візуалізації зображення розміром $N \times N$ точок досить отримати дані про N точок на СВІ для N збуджень даної площини при різних значеннях одного з градієнтів, що лежить в нашій площині. Градієнт, що робить селекцію площини називається градієнтом вибору шару (slise), градієнт, що лежить в виділеній площині і змінюється називається фазовим або градієнтом фазового кодування (phase), а третій - градієнтом зчитування або градієнтом частотного кодування (read). Для збудження використовують РЧ імпульси які відхиляють спіни на певний кут. Відновлення ведеться за формулою:

$$\rho\left(\frac{n_x}{NT}, \frac{n_y}{NT}\right) = \sum_{l=-\frac{1}{2}N}^{\frac{1}{2}N-1} \sum_{m=-\frac{1}{2}N}^{\frac{1}{2}N-1} S(lT, mT) \exp\left[-\frac{2\pi i n_x l}{N} - \frac{2\pi i n_y m}{N}\right] \quad (3)$$

N - розмір матриці даних, T - дискретність АЦП.

Цей метод називають Фур'є зейматографією. Його використовують в більшості томографів.

Приклад імпульсної послідовності приведено на рис. 9.

Реконструкція зображень

Фур'є реконструкція

Коли в рівнянні (3) величини $k_{x,y,z} = (2\pi)^{-1} \gamma G_{x,y,z} t_{x,y,z}$, тобто лінійно залежать від значень градієнтів та часу, що відповідає прямокутній декартовій сітці у Фур'є просторі, реконструкцію зображень спінової густини доцільно проводити за допомогою перетворення Фур'є вхідних даних. У дискретному випадку за формулою (3). Як показала практика ці методи є одними з найкращих методів реконструкції магніторезонансних томографічних зображень, оскільки мають низький рівень шумів, малі артефакти, високу обчислювальну ефективність (порядку $N \log_2 N$ операцій при використанні швидкого перетворення Фур'є). Для даного методу реконструкції характерний певний набір артефактів, що пов'язані з неврахуванням релаксації, обмеженням кількості даних, неоднорідністю магнітного поля та наявністю інших неідеальностей, що невраховані в (2). Обмеження кількості даних призводить до появи Гібсівських артефактів, що обумовлені згорткою функції зображення з функцією розмиття точки, яка є перетворенням Фур'є від функції вікна, що обмежує дані. Для прямокутного вікна це призводить до появи викидів на контурах об'єктів та до появи характерного шуму. Для боротьби з цим явищем використовують множення вхідних даних на функцію вікна $w(n\Delta k)$ певної форми, що зменшує даний артефакт, а також роздільну здатність та шум. У цьому випадку роздільна здатність $\delta x \quad \delta x = \frac{1}{\sum_{n \in N_{data}} [w(n\Delta k) / w(0)]}$. Максимально можлива

роздільна здатність $\delta x_{opt} = \frac{1}{N_{data} \Delta k}$, де Δk — крок збору даних у Фур'є просторі.

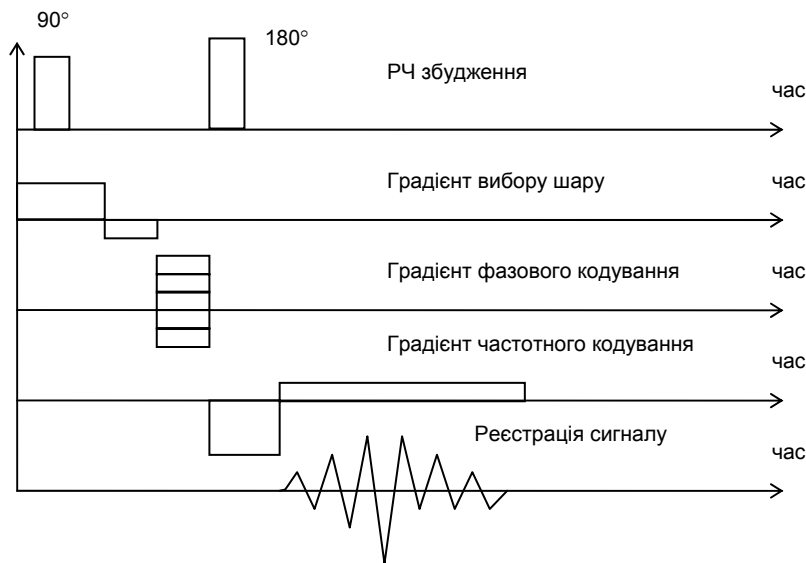


Рис 9 — Цикл послідовності спінового відлуння.

Реконструкція на основі авторегресійних (АР) методів

Ці методи належать до параметричних методів: вхідні дані представляються певною моделлю, параметри якої знаходяться з реальних даних, а за параметрами відбувається реконструкція зображення. Вхідні дані $x[n]$ у випадку авторегресійної моделі представляються як випадковий процес

$$x[n] = -\sum_{k=1}^m a[k] x[n-k] + e[n] \quad (4)$$

де параметри моделі $a[k]$ — авторегресійні коефіцієнти, $e[n]$ — білий шум, m — порядок моделі. З рівняння (4) легко знайти оцінку спектральної густини потужності, що відповідає квадрату функції розподілу спінів, промодульованої часами релаксації:

$$\rho^2 = P_{AR} = \frac{P_w}{|A(f)|^2}$$

де $A(f)$ — Фур'є спектр авторегресійної послідовності нашого процесу, P_w - дисперсія білого шуму. Для оцінки параметрів моделі часто використовують методи на основі лінійного передбачення, коли в рівнянні (4) $e[n]$ трактується як помилки апроксимації вхідних даних параметрами моделі і мінімізуються за методом найменших квадратів. До таких методів належить метод Берга, коваріаційний та ін. Оскільки (4) дозволяє екстраполювати сигнал на всій числовій осі (при відомих $a[k]$), то оцінка спектра має більшу роздільну здатність. Дані методи можна вважати методами надрозрізнення.

Метод мінімальної дисперсії

Метод мінімальної дисперсії [5-8] належить до непараметричних. Розглянемо фільтр з $p+1$ коефіцієнтами $a[0]..a[p]$. Сигнал на виході фільтру $y[n]$, що відповідає вхідним даним $x[n]$:

$$y[n] = \sum_{k=0}^p a[k]x[n-k] = x^T[n]a$$

Дисперсія сигналу на виході фільтру визначається виразом

$$p = \langle |y[n]|^2 \rangle = a^H R a, \text{ де } R \text{ — кореляційна матриця сигналу на вході.}$$

Накладемо умову

$$\sum_{k=0}^p a[k] \exp(-j2\pi f_0 k T) = e^H(f_0) e = 1 \quad (5)$$

Тобто частотна характеристика фільтру на частоті f_0 рівна 1. Отже синусоїда пройде через фільтр без спотворень. Метод мінімуму дисперсії полягає у мінімізації дисперсії сигналу на виході фільтру

при умові (5). Коефіцієнти фільтру: $a = \frac{R^{-1}e(f_0)}{e^H(f_0)R^{-1}e(f_0)}$

$$\text{Дисперсія на виході фільтру } p = \frac{1}{e^H(f_0)R^{-1}e(f_0)}$$

Дисперсія сигналу на виході фільтру є хорошим індикатором потужності синусоїди. Для оцінки кореляційної послідовності сигналу можна використовувати авторегресивні методи. Матриця обернена до кореляційної може бути представлена у вигляді [9, 10]:

$$R^{-1}_p = A_p P_p^{-1} A_p^H = \frac{1}{\rho_p} T_p T_p^H - \frac{1}{\rho_p} S_p S_p^H, \text{ де}$$

$$A_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_p[1] & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_p[p-1] & a_p[p-1] & \cdots & 1 & 0 \\ a_p[p] & a_p[p-1] & \cdots & a_p[1] & 1 \end{pmatrix}$$

$$S_p = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_p^*[1] & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_p^*[p-1] & a_p^*[p-1] & \cdots & 0 & 0 \\ a_p^*[p] & a_p^*[p-1] & \cdots & a_p^*[1] & 0 \end{pmatrix}$$

матриці A_p параметрів, ρ_p — дисперсія білого шуму для моделі порядку p . У випадку, коли відгуком точки з синусоїди, вираз для спектральної оцінки мінімуму дисперсії (що відповідає квадрату спі-

нової густини, що промодульована часами релаксації) можна спрощено записати у вигляді [11, 12]: $P(f) = \frac{1}{\sum_{k=-p}^p \psi[k] \exp(-j2\pi f k T)}$, де

$$\psi[k] = \begin{cases} \frac{1}{\rho_p} \sum_{i=0}^{p-k} (p+1-k-2i) a_p[k+i] a_p^*[i], & 0 \leq k \leq p \\ \psi^*[-k], & -1 \geq k \geq -p \end{cases}$$

Як метод спектрального оцінювання цей метод має гіршу роздільну здатність ніж авторегресійні методи, проте кращу ніж класичні, особливо при довгих послідовностях даних.

Програма інтерактивної обробки ЯМР даних

Програма призначена для реконструкції зображень за сигналом ЯМР томографа “Образ-1” (виробництво Росії). При запуску програми відображається діалог “ЛАБ. з МРТ РЕКОНСТРУКЦІЇ”

Операції з даними доступні через панель діалогу “**Операції з даними**”. Для виконання певної операції необхідно вибрати з списку комбо боксу назву операції.

Програма дозволяє виконувати наступні операції з даними:

- ◆ Елемент списку “**Завантаження даних**”: Завантаження даних експерименту для різних типів імпульсних послідовностей у форматі зберігання проміжних даних системи “Образ-1” (*.fil). Кожна точка даних є комплексним числом, що має 2 байти на дійсну та уявну частину. Тип імпульсної послідовності повинен бути вказаний користувачем, оскільки файл з даними не містить всієї необхідної інформації для завантаження. Від типу імпульсної послідовності залежать зокрема кількість фазових кодувань, кількість точок збору під час частотного кодування, кількість перерізів. Дані у програмі представляються у вигляді матриць, вектори яких відповідають певному значенню градієнта частотного та фазового кодування.
- ◆ Елемент списку “**Транспонування матриць**”: Транспонування всіх матриць даних.
- ◆ Елемент списку “**Швидке Фур'є перетв. колонок**”: Швидке перетворення Фур'є (FFT) для стовпців (колонок) матриць. (Результат заноситься на місце вихідних даних у колонки матриці).
- ◆ Елемент списку “**Метод Берга для колонок**”: Оцінку спектральної густини потужності за методом Берга оцінки авторегресійних параметрів для колонок (стовпців) матриць. (Результат заноситься на місце вихідних даних у колонки матриці).
- ◆ Елемент списку “**Метод Мін Дисперсії для колонок**”: Оцінку спектральної густини потужності за методом мінімальної дисперсії для колонок (стовпців) матриць. (Результат заноситься на місце вихідних даних у колонки матриці).

- ◆ Елемент списку **“Зсув рядків”**: Циклічний зсув даних на півперіоду для стовпців (колонок) матриць.
- ◆ Елемент списку **“Застосування вікна для колонок”**: Множення всіх колонок всіх матриць даних на функцію вікна
- ◆ Елемент списку **“Відображення амплітуди”**: Відображення амплітуди комплексних значень даних
- ◆ Елемент списку **“Відображення дійсної частини”**: Відображення дійсної частини комплексних значень даних
- ◆ Елемент списку **“Відображення уявної частини”**: Відображення уявної частини комплексних значень даних
- ◆ Елемент списку **“Відображення фази”**: Відображення фази комплексних значень даних.

Крім того доступний режим відображення даних у формі двовимірного графіку через кнопку **“Відображення як графік”**.

Параметри операцій доступні через панель діалогу **“Параметри”**:

Список комбо-боксу **“Імпульсна послідовність”** дозволяє вибрати імпульсну послідовність певного типу та завантажити параметри, що відповідають даній послідовності.

Панель **“Матр. даних”** відображає кількість рядків (ряд.) та колонок (кол.) матриць даних.

Елементи панельки **“Вікно”** дозволяють вибрати різний тип вікна (список комбо-боксу) та відобразити його ширину (розм.). Типи вікон, що доступні в програмі:

“Вікно Хана”, - $w[n] = \cos^2(2\pi[n])$

“Прямокутне вікно”, $w[n] = 1$

“Вікно Хемінга”, $w[n] = 0.54 + 0.46 \cos(2\pi[n])$

“Гаусоподібне”, $w[n] = \exp(-0.125 * t^2[n])$

“Вікно Бартлета” $w[n] = 1 - 2|t[n]|$

“Ручний режим” Задавання форми вікна інтерактивно.

$t[n] = \frac{n - (N - 1) / 2}{N - 1}$, N — ширина вікна

Блок редагування **“МД та АР”** містить порядок моделі авторегресійного методу оцінки спектральної густини та методу мінімальної дисперсії оцінки спектральної густини.

Зазначимо, що поставлені задачі можуть бути розв’язані різними способами.

Хід виконання

1. Завантажити один-два файли даних сигналу томографічного обстеження для вказаної викладачем імпульсної послідовності з вказаного викладачем каталогу. Відобразити амплітуду, дійсну частину,

уявну частину та фазу сигналу у вигляді зображень та графіків. Які відліки сигналу відповідають максимальним значенням фазокодуєчого градієнту, які мінімальним?

2. Перезавантажити дані. Для завантажених даних за допомогою операцій застосування вікна, швидкого перетворення Фур'є, транспонування матриць та зсуву рядків на період, реконструювати зображення розподілу спінової густини, що промодульована часами релаксації.

3. Відобразити амплітуду, дійсну частину, уявну частину та фазу реконструйованої функції розподілу у вигляді зображень та графіків. Яку інформацію про досліджуваний об'єкт несе кожна з розглянутих характеристик?

4. Оцінити шумові властивості зображень шляхом обрахування середньоквадратичного відхилення області фону для декількох типів вікон або вікон різної ширини. Оцінити візуально роздільну здатність та артефакти при використанні різних типів вікон. Для цього потрібно повторити пункт 2-а необхідну кількість разів.

Завдання.

1. На прикладі запису даних сигналу томографічного обстеження ознайомитись з характером реального томографічного сигналу. Порівняти інформативність дійсної частини, уявної частини, амплітуди сигналу як окремо так і у сукупності.

2. Провести реконструкцію зображень за реальними томографічними даними за допомогою класичного методу (перетворення Фур'є з вікном). Порівняти як впливає тип вікна на шумові властивості реконструйованих зображень та на артефакти, що виникають в процесі реконструкції.

3. Провести реконструкцію зображень за реальними томографічними даними з використанням методів оцінки спектральної густини потужності на основі авторегресійного методу спектрального оцінювання та методу мінімальної дисперсії, порівняти шумові властивості та артефакти реконструйованих зображень з класичними методами.

4. Результати порівняння повинні бути оформлені у вигляді довільної таблиці. Для зручності можна використовувати Excel або Word.

Додаткове завдання.

1. Перезавантажити дані. Для завантажених даних за допомогою операцій застосування вікна, швидкого перетворення Фур'є, транспонування матриць, зсуву рядків на період, методу Бегра та мінімуму дисперсії реконструювати зображення розподілу спінової густини, що промодульована часами релаксації.

2. Оцінити шумові властивості зображень шляхом обрахування середньоквадратичного відхилення області фону для декількох типів

вікон або вікон різної ширини. Оцінити візуально роздільну здатність та артефакти при використанні цих методів. Порівняти результати з класичним методом реконструкції.

Контрольні запитання

1. Розподіл яких характеристики речовини можна візуалізувати за допомогою магніторезонансної томографії?
2. Яким чином проводиться просторове розділення різних точок досліджуваних об'єктів?
3. Як впливає неоднорідність магнітного поля та просторова нелінійність градієнтів на реконструйовані зображення?
4. Чому використовується комплексний сигнал?
5. Як збільшити різкість реконструйованих зображень?