

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.635

ОДНОВРЕМЕННОЕ ПОДАВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ВОДЫ И ЖИРА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Н. В. Анисимов

(Учебно-научный межфакультетский и междисциплинарный Центр магнитной
томографии и спектроскопии МГУ им. М. В. Ломоносова)

E-mail: nvanis@eva.cmts.msu.ru

Приведен расчет импульсной последовательности, работающей по методике инверсия–восстановление и предназначенной для одновременного подавления сигналов воды и жира в экспериментах по магнитно-резонансной томографии. Эффективность методики иллюстрируется на примере объемной визуализации внутричерепных патологических образований.

Введение

Сигналы жира и воды часто затрудняют проведение исследования по магнитно-резонансной томографии (МРТ). Это связано с тем, что ткани, содержащие жир или несвязанную воду, дают избыточно яркое МРТ изображение, из-за чего сложно выявить вариации контраста для тканей, представляющих диагностический интерес. Поэтому в ходе МРТ-исследования часто применяется подавление сигналов воды или жира [1]. Практика МРТ-исследования показала, что подавление только одного тканевого компонента не всегда создает условия для надежной локализации патологических образований, и во многих случаях необходимо обеспечивать одновременное подавление сигналов воды и жира.

Для понимания концепции подавления сигналов от нежелательных тканевых компонентов рассмотрим МРТ-сканирующую импульсную последовательность в виде двух составных частей — подготовительной и визуализирующей. В подготовительной части производится селекция спинов по временам продольной релаксации T_1 . Для этого спиновая система выводится из равновесного состояния радиочастотными (РЧ) импульсами, после этого выдерживается пауза, необходимая для частичного или полного (в зависимости от T_1) восстановления продольной намагниченности. От достигнутой величины продольной намагниченности зависит величина регистрируемого сигнала, поскольку после запуска визуализирующей части РЧ импульс преобразует продольную намагниченность в поперечную, которая способна индуцировать сигнал ЯМР в приемную катушку датчика.

В рамках такого представления легко понять принцип подавления сигналов воды или жира известными методами, основанными на методике инверсия–восстановление — FLAIR (FLuid Attenuated Inversion Recovery) и STIR (Short Time Inversion Recovery) [2, 3]. Оба метода используют в подгото-

вительной части 180° импульс и паузу, подобранную так, чтобы к запуску визуализирующей части продольная намагниченность подавляемого компонента (вода или жир) проходила через ноль в результате релаксационного перехода от инверсного состояния к равновесному. Методы FLAIR и STIR различаются временем задаваемой паузы — в поле 0.5 Тл эти паузы составляют 1300 мс и 80 мс соответственно.

Описание метода

Для одновременного подавления сигналов воды и жира мы как бы объединяем два метода FLAIR и STIR, для чего комбинируем подготовительную часть из двух 180° импульсов, разделенных специальным интервалом T_W , и задаем паузу T_F перед визуализирующей частью сканирующей последовательности, с тем чтобы запуск визуализирующей части начался в момент, когда продольные намагниченности как воды, так и жира одновременно проходят через ноль за счет релаксационного процесса. Принцип работы такой импульсной последовательности можно пояснить с помощью диаграммы (рис. 1). Изображенный на диаграмме 90° импульс

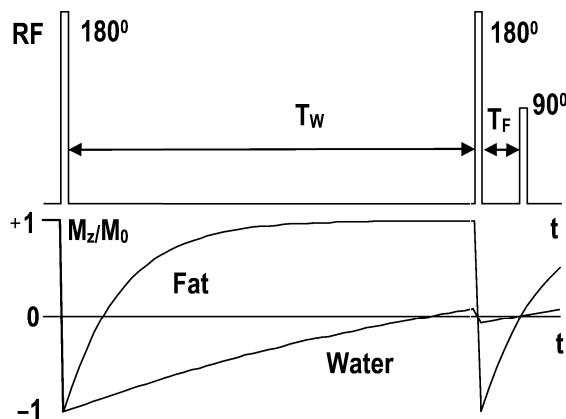


Рис. 1. Диаграмма импульсной последовательности (верхняя кривая) и эволюция продольной намагниченности для жира и воды (нижние кривые)

обозначает начальный этап визуализирующей части сканирующей импульсной последовательности.

Первый 180° импульс меняет знак продольной намагниченности как воды, так и жира. После этого начинается возвращение обоих компонентов к равновесному состоянию за счет релаксации. По прошествии интервала времени T_W после релаксационного перехода продольной намагниченности воды через нуль и практически полного восстановления намагниченности жира подается второй 180° импульс. Теперь возвращение к равновесному состоянию начинается с различных уровней — близкого к нулю для воды и почти полностью инверсного для жира. При получившейся новой стартовой позиции становится возможным одновременный переход продольных намагниченностей воды и жира через нуль через интервал T_F . Эффект одновременного перехода через ноль продольных намагниченностей с разными временами релаксации достигается за счет согласования скоростей возврата продольных намагниченностей к равновесному состоянию с начальными значениями этих намагниченностей.

Расчет импульсной последовательности

Расчет необходимых задержек T_W и T_F можно произвести на основе известной векторной модели Блоха. Будем считать, что длительность 180° импульса достаточно мала, чтобы за время его воздействия на спиновую систему можно было пренебречь релаксационными процессами и «разбеганием» спинов в поперечной плоскости из-за разницы в химических сдвигах. При таком рассмотрении воздействие 180° импульсов сводится только к инверсии (обращению знака) продольной намагниченности, а вкладом поперечных компонентов вектора намагниченности можно полностью пренебречь.

Тогда уравнение Блоха для продольной компоненты вектора намагниченности M_z , имеющей в равновесном состоянии значение M_0 , при отсутствии РЧ импульсов имеет вид

$$dM_z/dt = -(M_z - M_0)/T_1.$$

Общее решение этого уравнения запишем, введя безразмерную величину $S = M_z/M_0$. Тогда

$$S(t) = 1 - (1 - S(0)) \exp(-t/T_1). \quad (1)$$

После действия первого 180° импульса, инвертирующего равновесную намагниченность, имеем

$$S(t) = 1 - 2 \exp(-t/T_1). \quad (2)$$

Если спустя интервал T_W подать еще один 180° импульс, то величина $S(t)$, достигшая за счет релаксации значения $S(T_W) = 1 - 2 \exp(-T_W/T_1)$, изменит знак и дальнейшая эволюция намагниченности пройдет согласно уравнению (1), где $S(0) = -S(T_W)$.

В результате возвращение к равновесному состоянию спиновой системы, подвергшейся воздействию

двух 180° импульсов, разделенных интервалом T_W , можно описать формулой

$$S(t) = 1 - 2(1 - \exp(-T_W/T_1)) \exp(-t/T_1), \quad (3)$$

где время t отсчитывается относительно момента окончания второго 180° импульса.

Из формулы (3) можно определить $t = T_F$, при котором величина $S = S(T_1)$ обратится в нуль. При этом для каждой пары значений T_W и T_F можно найти два значения T_1 , которые мы обозначим как T_{1W} и T_{1F} , для которых величина S обращается в нуль. На практике актуальнее решить обратную задачу: для заданной пары T_{1W} и T_{1F} найти значения T_W и T_F , при которых величина S обращается в нуль.

При произвольных соотношениях между T_{1W} и T_{1F} найти аналитическое решение этой задачи непросто — введя безразмерные величины $k = T_{1F}/T_{1W}$, $x = T_W/T_{1W}$, $y = T_F/T_{1W}$, мы получим систему нелинейных уравнений

$$(1 - \exp(-x)) \exp(-y) - \frac{1}{2} = 0,$$

$$(1 - \exp(-x/k)) \exp(-y/k) - \frac{1}{2} = 0.$$

Однако при $k \ll 1$ уравнения линеаризуются, и приближенное решение для x и y (в первом приближении по параметру k) находится просто: $x = (1 + k) \ln 2$, $y = k \ln 2$. Возвращаясь к размерным величинам, получаем

$$T_W = (T_{1W} + T_{1F}) \ln 2 \quad \text{и} \quad T_F = T_{1F} \ln 2. \quad (4)$$

При этих задержках в импульсной последовательности $180^\circ - T_W - 180^\circ - T_F$ продольные намагниченности спинов, имеющих времена продольной релаксации T_{1W} и T_{1F} , причем $T_{1F} \ll T_{1W}$, обращаются в нуль одновременно.

С помощью формулы (3) можно найти зависимость величины продольной намагниченности для спинов, имеющих произвольные времена релаксации T_1 , которые подверглись воздействию двухимпульсной последовательности с параметрами, приведенными в формулах (4). Для этого формулу (3) перепишем в виде

$$S(T_1) = 1 - 2(1 - \exp(-(T_{1W} + T_{1F}) \ln 2/T_1)) \times \exp(-T_{1F} \ln 2/T_1). \quad (5)$$

Теперь полученные соотношения можно применить для решения часто возникающей в МРТ задачи по одновременному подавлению сигналов воды и жира. Времена продольной релаксации для несвязанной воды — T_{1W} и жира — T_{1F} существенно различаются. В частности, для поля 0.5 Тл это соотношение $k = T_{1F}/T_{1W}$ составляет $0.12 \text{ с}/1.9 \text{ с} = 0.06$. Поэтому для одновременного подавления сигналов воды и жира в соответствии с формулами (4) задаем импульсную последовательность $180^\circ - T_W - 180^\circ - T_F$, где $T_W = 0.69(1900 + 120) = 1380 \text{ мс}$, $T_F = 0.69 \times 120 = 80 \text{ мс}$. В качестве 180° импульсов исполь-

зуем короткие (3.6 мс) импульсы с обычной для МРТ гладкой формой огибающей.

Степень подавления компонентов с произвольным временем продольной релаксации после воздействия указанной импульсной последовательности можно оценить по формуле (5). Для этого введем безразмерную переменную $z = T_1/T_F$, после чего выражение (5) преобразуется к виду

$$S(z) = 1 - 2(1 - \exp(-(\ln 2/z)(1/k + 1))) \exp(-\ln 2/z). \quad (6)$$

Если теперь подставить известное из экспериментов в поле 0.5 Тл значение $k = T_{1F}/T_{1W} = 0.06$, то получим график, представленный на рис. 2. Там же представлены графики для импульсных последовательностей STIR и FLAIR, разработанных для подавления только одного из компонентов — жира и свободной воды соответственно.

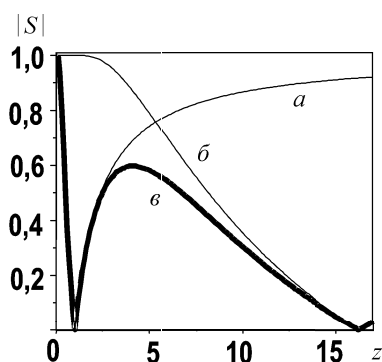


Рис. 2. Зависимость величины регистрируемого сигнала от времени релаксации T_1 для импульсных методик, основанных на эффекте инверсия-восстановление: (а) — STIR; (б) — FLAIR; (в) — последовательность $180^\circ - T_W - 180^\circ - T_F$

Анализируя графики, можно отметить, что при одновременном подавлении сигналов воды и жира с помощью двухимпульсной последовательности по-

лезный сигнал подавляется более чем в 1.7 раза, что несколько больше по сравнению с режимами STIR и FLAIR. Этим объясняется наблюдаемое экспериментально снижение отношения сигнал/шум на МРТ-изображениях, полученных с одновременным подавлением сигналов воды и жира, по сравнению с изображениями, полученными с подавлением только одного из компонентов при одинаковом числе накоплений (обычно 2–3 накопления). В то же время следует отметить, что при подавлении сильных фоновых сигналов расширяется динамический диапазон приемного тракта, что благоприятно для длительного накопления слабого сигнала.

Предлагаемый двухимпульсный метод можно модифицировать с целью сокращения времени подготовительного этапа. Для этого 180° импульсы можно заменить импульсами с меньшими, хотя и большими чем 90° , углами поворота вектора намагниченности. Однако в этом случае следует принять меры для подавления поперечной намагниченности, например с помощью импульсов неоднородного магнитного поля (градиентных импульсов). Кроме того, при подобной модификации придется смириться со значительным ослаблением полезного сигнала. Повысить величину полезного сигнала можно, формируя частотно селективные (учитывая величины химических сдвигов воды и жира) 180° импульсы [4].

Результаты экспериментов и обсуждение

Мы реализовали методику одновременного подавления сигналов воды и жира на МР-томографе TOMIKON S50 («Bruker»). Благодаря этому нам удается более надежно визуализировать патологические образования — опухоли, мягкотканые образования, гематомы, зоны кровоизлияний и т. п., прилегающие к границам жировой ткани и свободной

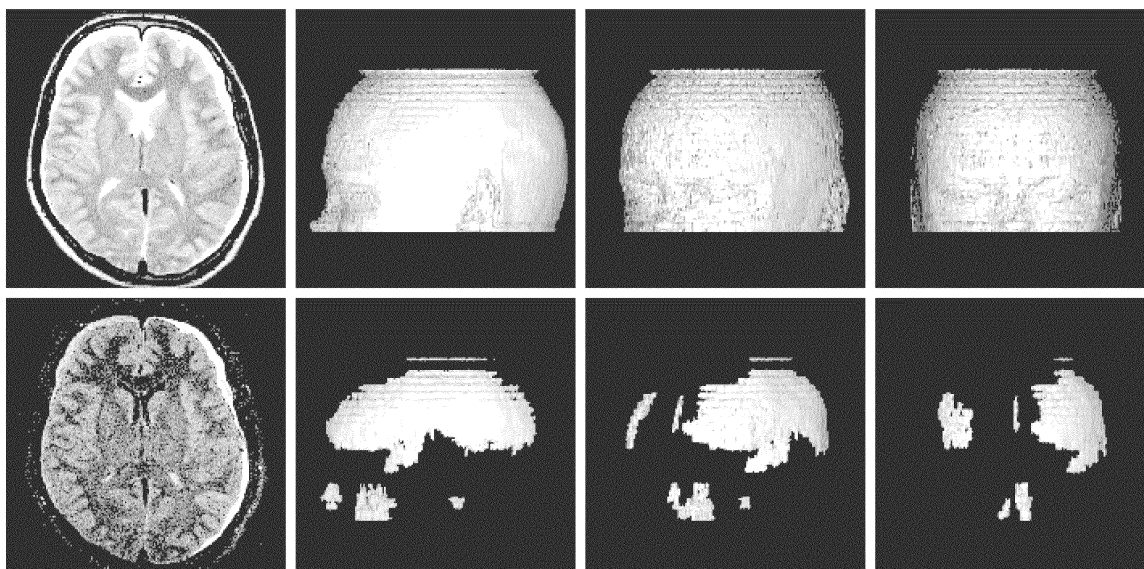


Рис. 3. 3D-реконструкции, получаемые при обычном МР-сканировании (верхний ряд) и при сканировании с одновременным подавлением сигналов воды и жира (нижний ряд)

воды [4, 5]. За счет упрощения картины тканевого контраста создаются наиболее благоприятные условия для сегментации и построения 3D графических изображений этих образований [6]. Пример 3D-реконструкции представлен на рис. 3. В верхнем ряду: левый кадр — изображение одного из аксиальных срезов, получаемых при обычном МРТ-сканировании; три кадра справа — реконструированное из этих срезов объемное МРТ-изображение, представленное в нескольких ракурсах. В нижнем ряду — аналогичные объекты — аксиальный срез и объемные реконструкции, получаемые после МР-сканирования с одновременным подавлением сигналов воды и жира.

В обоих случаях объемное изображение субдуральных гематом получено путем интерполяционной обработки 22 МРТ-срезов толщиной 6 мм с использованием одного и того же алгоритма сегментации. Если сигнал жира не подавлен, то обычный алгоритм сегментации строит объемное изображение по жировой оболочке, дающей яркий сигнал на МРТ-изображениях. Подавление сигналов воды и жира позволяет исключить из рассмотрения яркий поверхностный жировой слой, а также желудочки мозга, содержащие свободную воду, и построить объемную картину распределения гематом. Время продольной релаксации гематомы имеет промежуточное значение относительно тканей, содержащих воду или жир, поэтому гематома хорошо визуализируется при их одновременном подавлении.

Предлагаемый двухимпульсный способ одновременного подавления сигналов воды и жира прост в

реализации, не требует точных частотных настроек аппаратуры. Его можно использовать не только в МР томографии, но и в экспериментах по ЯМР высокого разрешения для решения проблем, связанных с подавлением сигналов от растворителей и других нежелательных для регистрации компонентов.

Автор признателен профессору Ю. А. Пирогову и Л. В. Губскому за полезные обсуждения и В. В. Гладуну за помощь в графической обработке данных МРТ.

Литература

1. *Keroiler E.D., Willig A.L., Clement O.* et al. // *J. Biomed. and Pharmacother.* 1998. **52**. P. 69.
2. *Bydder G.M., Young I.R.* // *J. Comput. Assist. Tomogr.* 1985. **9**. P. 59.
3. *Fleckenstein J.L., Archer B.T., Barker B.A.* et al. // *Radiology.* 1991. **197**. P. 499.
4. *Oh C.H., Hilal S.K., Cho Z.H.* // *Proc. of the Society for Magnetic Resonance in Medicine Annual Meeting.* 1988 (San Francisco). **17**. P. 1042.
5. *Pirogov Yu.A., Anisimov N.V., Gubskii L.V.* // *Proc. SPIE.* (San-Diego). 2002. **4681**. P. 612.
6. *Пирогов Ю.А., Анисимов Н.В., Губский Л.В.* // *Биомед. техн. и радиоэлектроника.* 2002. **3**. С. 29.
7. *Pirogov Yu.A., Anisimov N.V., Gubskii L.V.* // *Proc. SPIE* (San-Diego). 2003. **5030**. P. 939.

Поступила в редакцию
12.09.03