

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 53.07

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПРИЕМНИК ДЛЯ ЯМР-ТОМОГРАФА

© 2024 г. В. А. Шагалов^{а,*}, А. Р. Фахрутдинов^а, Я. В. Фаттахов^а, В. Л. Одиванов^а

^аКазанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского

Казанского научного центра Российской академии наук

Россия, 420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7

*e-mail: vash@kfti.knc.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 11.09.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

Описан широкополосный приемник сигналов ЯМР на современной элементной базе для медицинского томографа. Разработанный приемник выполнен с применением широкополосных комплектующих, что позволяет применять его как для исследования различных ядер, так и для использования в магнитных полях различной напряженности. Указанный приемник может найти применение для работы в составе различных устройств на основе ЯМР, таких как томографы и релаксометры. Для управления приемником разработано устройство на основе микросхемы программируемой логики. Применение микросхем программируемой логики позволяет легко адаптировать приемник для работы с различными протоколами управления в рамках одного устройства, либо в различных устройствах. Для прошивки микросхемы программируемой логики создано встроенное программное обеспечение.

DOI: 10.31857/S0032816224030162 EDN: OULPST

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-резонансная томография (МРТ) на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных методов медицинской диагностики заболеваний. Метод основан на обнаружении изменений релаксационных свойств тканей при развитии различных патологических процессов. Метод является безопасным как для пациентов, так для и врачей, так как он не связан с применением ионизирующего излучения или радиоактивных материалов. Недостатком метода МРТ является его невысокая чувствительность. Традиционным способом повышения отношения сигнал/шум в МРТ является увеличение напряженности основного магнитного поля. Однако магнитно-резонансные томографы с высокими магнитными полями, построенные на массивных сверхпроводящих магнитах, имеют высокую стоимость и сложны в эксплуатации.

В настоящее время в мире наблюдается повышение интереса к средне- и низкополевой то-

мографии [1, 2]. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, это связано с физическими особенностями поведения спиновых систем в низких магнитных полях, такими, например, как уменьшение времени спин-решеточной релаксации (T_1) с понижением напряженности магнитного поля, что позволяет уменьшить время повтора при сканировании. Также в низких магнитных полях уменьшаются артефакты, связанные с искажениями сигналов на границе между тканями с различной магнитной восприимчивостью. В работе [1] показано, что наилучший контраст белого и серого веществ головного мозга достигается на частотах 10–20 МГц. Таким образом, показано, что наилучший контраст на изображениях может быть достигнут с помощью низкополевых приборов. Во-вторых, совершенствование аппаратно-программного обеспечения (использование сложных радиочастотных катушек и оптимизированных импульсных последовательностей) повышает диагностические возможности низкополевых

систем [2]. К достоинствам таких томографов можно отнести их невысокую стоимость и простоту обслуживания.

В лаборатории методов медицинской физики КФТИ КазНЦ РАН ранее были разработаны и изготовлены несколько магнитно-резонансных томографов на резистивных магнитах с индукцией 0.02 Тл и 0.06 Тл [3].

В настоящее время в лаборатории совместно с ООО «Градиент МРТ» разработан и изготовлен опытный образец магнитно-резонансного томографа на базе постоянного магнита с индукцией поля 0.4 Тл. Для управления работой томографа в лаборатории разработан и изготовлен радиоспектрометр [4], некоторые блоки которого описаны в работах [5, 6]. Описываемый приемник ЯМР-сигнала разработан для работы в составе указанного спектрометра.

Современная элементная база, как правило, позволяет осуществлять управление основными функциями с помощью цифрового интерфейса. Поэтому во многих современных разработках применяются микросхемы программируемой логики для управления различными компонентами разрабатываемых приборов (см., например, [7, 8]). Использование подобных технологий обеспечивает гибкость и универсальность схем управления. Также применение микросхем программируемой логики позволяет перепрограммировать устройство в процессе его эксплуатации. В данном случае управление всеми функциями приемника также выполнено с применением микросхем программируемой логики.

Для работы описываемого приемника разработано встроенное программное обеспечение.

Приемник включает следующие составные блоки:

- регулируемый высокочастотный усилитель для усиления сигнала ЯМР, поступающего с предварительного усилителя, расположенного непосредственно возле приемного датчика,
- двухканальный фазовый детектор для детектирования составляющих сигналов ЯМР с нулевыми и 90-градусными фазами,
- двухканальный регулируемый низкочастотный фильтр для фильтрации детектированных сигналов с нулевыми и 90-градусными фазами,
- двухканальный усилитель низкой частоты,
- запоминающее устройство (ЗУ), предназначенное для хранения набора кодов, необхо-

димых для управления регулируемым высокочастотным усилителем в ходе выполнения импульсной программы,

- устройство управления приемником сигналов ЯМР, предназначенное для связи с шиной управления спектрометра ЯМР, а также для осуществления управления всеми блоками приемника как по командам компьютера, так и под управлением программатора в ходе исполнения соответствующей импульсной программы.

Далее будут более подробно рассмотрены ключевые блоки приемника.

2. ОПИСАНИЕ ПРИЕМНИКА

Блок-схема приемника сигналов ЯМР представлена на рис. 1. В качестве входного усилителя в описываемом приемнике применен регулируемый усилитель фирмы Analog Devices AD8369 [9]. К достоинствам данной микросхемы можно отнести достаточно широкую полосу частот и низкий уровень собственных шумов. Также в этом усилителе осуществляется цифровая регулировка усиления, что позволяет исключить из схемы приемника отдельный аттенуатор. Радиочастотный сигнал с предварительного усилителя поступает на регулируемый усилитель через широкополосный трансформатор. Далее высокочастотный сигнал поступает на два фазовых детектора — аналоговых перемножителей, на другие входы которых подаются опорные сигналы с нулевой и 90-градусной фазами соответственно. На выходе перемножителей формируются низкочастотные сигналы действительной и мнимой составляющих сигнала ЯМР, которые подаются на управляемые фильтры нижних частот, выполненные на микросхемах MAX295 фирмы Maxim [10]. Указанные фильтры реализованы на основе переключаемых конденсаторов, они позволяют сконструировать легко перестраиваемые фильтры нижних частот высокого порядка. Перестройка полосы пропускания фильтров осуществляется изменением управляющей частоты. В разработанном нами варианте радиоспектрометра возможен выбор из четырех значений ширины полосы. Далее отфильтрованные сигналы усиливаются усилителями низких частот, оцифровываются аналого-цифровыми преобразователями и поступают на обработку в компьютер.

Управление узлами приемника осуществляется устройством, разработанным на основе микросхемы программируемой логики фирмы Altera серии MAX7000 (EPM7128) [11]. Специализированное программное обеспечение на основе микросхемы программируемой логики разработано нами на языке описания аппаратуры высокого уровня Verilog [12]. Для разработки, отладки и программирования на основе микросхемы программируемой логики использовалась система сквозного проектирования цифровых устройств Altera Quartus II Web Edition Software v7.0 фирмы разработчика применяемых микросхем [13]. На рис. 2 представлена блок-схема программы для управления приемником.

Назначение устройства управления состоит в осуществлении связи приемника с шиной спектрометра, а также в формировании сигналов управления блоками приемника. Программирование на основе микросхемы программируемой логики осуществляется с помощью протокола JTAG из программной среды разработки Altera Quartus II Web Edition.

Одним из достоинств применяемой элементной базы является то, что в микросхемах программируемой логики данной серии, в отличие от большинства других подобных микросхем, используется пятивольтовое питание, как и в цифровой части спектрометра. Это позволяет исключить преобразователи уровня, упрощает подключение к шине спектрометра и повышает надежность устройства. В качестве основы устройства управления также могут использоваться микросхемы указанной серии с большим числом логических ячеек (например, EPM7160). Подробнее созданное встроенное программное обеспечение описано в Свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ [14]. Связь приемника со спектрометром осуществляется по двунаправленной шине в составе:

- шины адреса A[4..0] размером 5 бит,
- двунаправленной шины данных D[5..0] размером 6 бит,
- стробов записи и чтения W и R,
- строба с программатора inc_a_pr для переключения адреса запоминающего устройства.

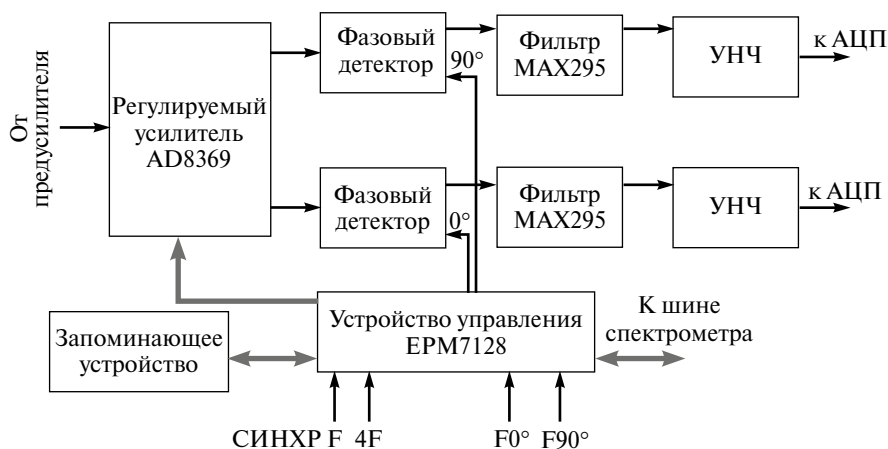


Рис. 1. Блок-схема приемника.

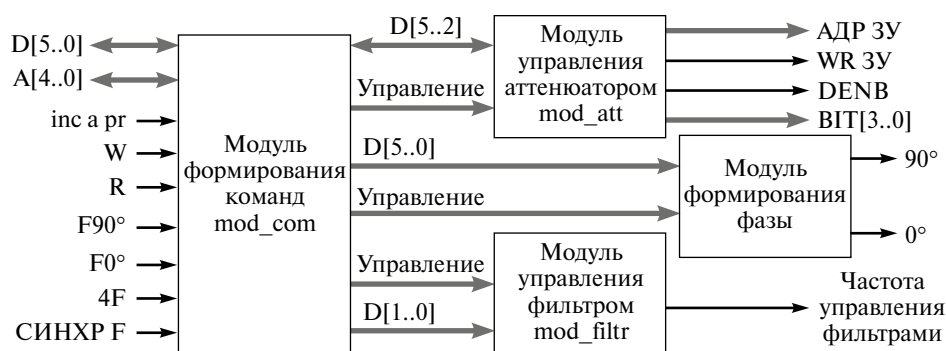


Рис. 2. Блок-схема программы для управления приемником.

Кроме указанных сигналов, на модуль управления также подаются сигналы опорной частоты F с фазами 0 и 90° , либо учетверенная частота $4F$ и сигнал синхронизации приемника и передатчика, что позволяет реализовать функционирование приемника в двух версиях.

В состав приемника также входит запоминающее устройство для хранения кодов управления усилением входного усилителя. Загрузка ЗУ осуществляется по шине спектрометра, а переключение адреса возможно как по команде от компьютера, так и по сигналу от программатора. В качестве ЗУ может быть применена любая пятивольтовая четырехбитная память с параллельной загрузкой емкостью не менее 512 слов. В данном случае применена одна микросхема K132PY8.

Встроенное программное обеспечение допускает функционирование приемника в двух версиях. Синтезатор частот в первом варианте спектрометра работает на учетверенной частоте, а рабочая частота формируется в приемнике и передатчике спектрометра при помощи четырехфазных триггеров (соответственно, формируются сигналы рабочей частоты с фазами 0° , 90° , 180° и 270° , а для синхронизации триггеров приемника и передатчика используется специальный синхросигнал). В другом же варианте спектрометра синтезатор формирует сигналы на рабочей частоте и имеет возможность непосредственно формировать фазы 0° , 90° , 180° и 270° рабочей частоты для приемника и передатчика. Для работы приемника могут быть использованы любые две фазы рабочей частоты, сдвинутые на 90° .

Встроенное программное обеспечение для управления приемником содержит следующие модули:

- 1) модуль формирования команд (`mod_com`),
- 2) модуль управления аттенуатором (`mod_att`),
- 3) модуль формирования фазы (`mod_ph`),
- 4) модуль управления фильтром (`mod_filt`).

Модуль формирования команд (`mod_com`) предназначен для связи приемника со спектрометром и далее с компьютером. В устройстве управления осуществляется дешифрация адреса для обращения к данному устройству. Также в этом модуле вырабатываются команды для управления всеми другими блоками, входящими в состав приемника.

Как указывалось ранее, в качестве входного усилителя в описываемом приемнике применен регулируемый усилитель фирмы Analog Devices AD8369, включенный по стандартной схеме согласно работе [9]. Цифровая регулировка усиления AD8369 может осуществляться как по последовательному, так и по параллельному интерфейсу. В данном устройстве управление реализовано по параллельному интерфейсу, так как в спектрометре управление осуществляется по параллельной шине.

При параллельной работе четырехбитные данные устанавливаются на выводах от `BIT3` до `BIT0` и передаются в регистр управления усилением через мультиплексор. Данные фиксируются в регистре управления усилением микросхемы на спадающем фронте сигнала на входе `DENB`. Параллельный код `BIT3-BIT0` а также строб `DENB` формируются в модуле управления аттенуатором (`mod_att`), что позволяет изменять усиление в диапазоне $0-45$ дБ с шагом 3 дБ. Четырехбитное слово управления может непосредственно записываться в регистр управления усилением микросхемы AD8369 через буферный регистр с шины данных спектрометра. В случае необходимости изменять усиление в процессе работы импульсной программы в ЗУ приемника формируется массив четырехбитных данных для управления усилением, что позволяет выбирать шкалу для каждого цикла фазокодирования. Переключение усиления в этом случае осуществляется по стробу программатора `inc_a_rg`. Для запоминающего устройства (1024 четырехбитных слова) в модуле управления аттенуатором имеются адресный счетчик для адресации ЗУ и схема мультиплексирования сигналов `BIT3-BIT0`.

Фазовые детекторы выполнены на основе двойных балансных смесителей 174ПС1. Входной сигнал подается дифференциально с входного усилителя через разделительные конденсаторы. Опорные сигналы с фазами 0° и 90° через разделительные конденсаторы подаются с устройства управления.

Сигналы опорной частоты с фазами 0° и 90° для фазовых детекторов формируются в модуле формирования фазы (`mod_ph`). Возможны два способа выработки опорных частот. В первом случае опорные частоты с фазами 0° и 90° формируются четырехфазным триггером из сигнала учетверенной рабочей частоты $4F$, поступаю-

щего с синтезатора частот. В этом случае для синхронной работы приемника с передатчиком используется сигнал синхронизации, поступающий из передатчика. Во втором способе опорные частоты из синтезатора подаются одновременно на приемник и передатчик.

Как указывалось ранее, в приемнике применены управляемые фильтры нижних частот, выполненные на микросхемах MAX295 фирмы MAXIM на основе переключаемых конденсаторов, что позволяет сконструировать легко перестраиваемые фильтры нижних частот. Данная микросхема представляет собой фильтр Баттерворта восьмого порядка.

Управление полосой пропускания подобного фильтра осуществляется изменением управляющей частоты, подаваемой на микросхему. Полоса пропускания фильтра может изменяться от 0.1 Гц до 50 кГц, она равняется 1/50 управляющей частоты.

Для управления полосой пропускания фильтра в модуле управления фильтром формируется дискретный набор частот, соответствующий полосам пропускания фильтра 4, 8, 16 или 32 кГц. Конкретная полоса пропускания выбирается путем передачи на микросхему фильтра соответствующей управляющей частоты. Переключение полосы осуществляется подачей двухбитного кода на управляющие входы мультиплексора, через который управляющая частота поступает на микросхемы фильтров. Набор частот пропускания фильтра может быть легко изменен перепрошивкой микросхемы программируемой логики в процессе эксплуатации приемника.

В качестве усилителей низкой частоты в приемнике применены прецизионные операционные усилители OP177 фирмы Analog Devices.

3. ИЗМЕРЕНИЯ

Как было отмечено ранее, представленный приемник должен работать в составе спектрометра для томографа с индукцией магнитного поля 0.4 Тл. Резонансные частоты различных ядер меняются в данном поле от 1.266 МГц для ^{14}N до 17.511 МГц для ^1H . Поскольку разработанный приемник выполнен с применением достаточно широкополосных комплектующих, предполагается возможность работы разработанного прибора в широком диапазоне частот. Для проверки данного предположения была

измерена зависимость усиления приемника от частоты (рис. 3).

Из представленной амплитудно-частотной характеристики видно, что уровень выходного сигнала незначительно уменьшается на высоких частотах. Таким образом, использование данного приемника вполне возможно для частот до 20 МГц. На амплитудно-частотной зависимости точки (кроме двух крайних) соответствуют резонансным частотам различных ядер в поле 0.4 Тл. Некоторые из них на рис. 3 отмечены стрелками. Видно, что с помощью данного приемника могут проводиться эксперименты на различных ядрах, в том числе, например, на ядрах ^{23}Na .

В ходе измерений также была проверена линейность регулировки усиления встроенным в микросхему аттенюатором. На рис. 4 представлена зависимость выходного сигнала от установки аттенюатора.

Видно, что переключение усиления происходит достаточно линейно, и при изменении величины ослабления на 20 дБ величина сигнала изменяется как раз на порядок.

Основные технические характеристики приемника:

чувствительность:	не хуже 100 мкВ,
усиление:	не менее 1000,
диапазон рабочих частот:	1 — 20 МГц,
диапазон регулировки усиления:	45 дБ,
шаг регулировки усиления:	3 дБ.

4. ВЫВОДЫ

Применение современной элементной базы позволяет разработать достаточно простой в плане схмотехники прибор с хорошими характеристиками. Разработанный приемник, выполненный на широкополосных элементах, позволяет применять его как для исследования различных ядер, так и для использования в магнитных полях различной напряженности. Указанный приемник может найти применение для работы в составе различных устройств на основе метода ЯМР, таких как томографы и релаксометры различного назначения.

Применение микросхем программируемой логики позволяет легко адаптировать приемник для работы с различными протоколами управления в рамках одного устройства, либо в различных устройствах.

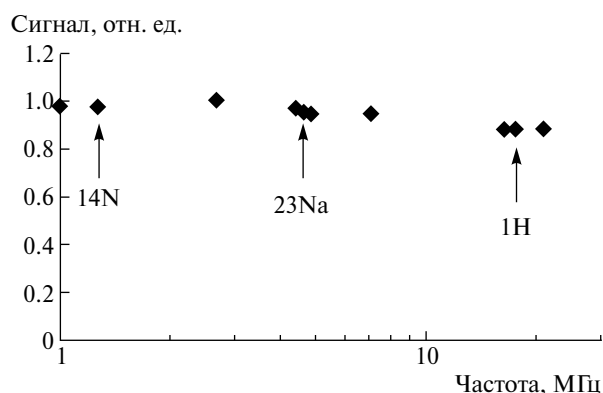


Рис. 3. Зависимость усиления приемника от частоты. По вертикальной оси приведена величина сигнала, нормированная на максимальную величину. Стрелками обозначены резонансные частоты некоторых ядер.

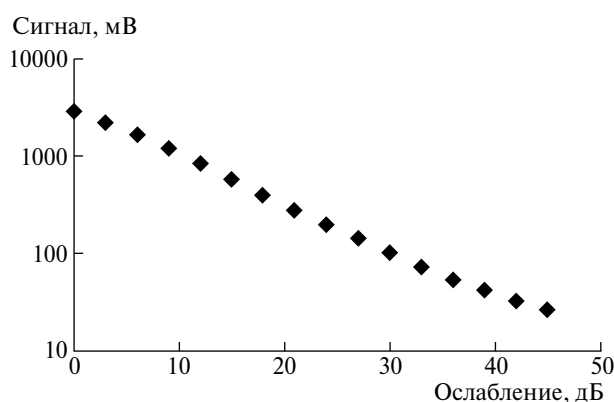


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала приемника от установки аттенюатора.

Для работы микросхемы программируемой логики разработано встроенное программное обеспечение на языке описания аппаратуры высокого уровня Verilog.

Для управления приемником ЯМР-спектрометра томографа разработаны соответствующие библиотеки в составе приложения верхнего уровня.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ Казанского научного центра РАН (номер регистрации в ЕГИСУ 122011800133-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Helmut W. Fischer, Peter A. Rinck, Yves van Haverbeke, Robert N. Muller // *Magnetic resonance in medicine*. 1990. V. 16. P. 317.
<https://doi.org/10.1002/mrm.1910160212>
2. Sarracanie M., LaPierre C.D., Salameh N., Waddington D.E.J., Witzell T., Rosen M.S. // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 15177.
<https://doi.org/10.1038/srep15177>
3. Салихов К.М., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Анашкин В.Н., Шагалов В.А., Биктимиров Э.Ф., Муртазина Э.М., Колесникова Н.В. // *Медицинская техника*. 2007. № 5. С. 39.
4. Шагалов В.А., Фахрутдинов А.Р., Фаттахов Я.В. // *ПТЭ*. 2017. № 6. С. 132.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217060118>
5. Габидуллин Д.Д., Гафиятуллин Н.М., Крылатых Н.А., Фаттахов Я.В. // *ПТЭ*. 2012. № 4. С. 49.
6. Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А. // *ПТЭ*. 2020. № 6. С. 89.
<https://doi.org/10.31857/S003281622006004X>
7. Кашаев Р.С., Темников А.Н., Ч. В. Тунг Ч.В., Н. Т. Киен Н.Т., О. В. Козелков О.В. // *ПТЭ*. 2019. № 2. С. 145.
<https://doi.org/10.1134/S003281621902023X>
8. Ксенофонтов С.Ю., А. В. Кунаев А.В., Василенкова Т.В., Терпелов Д.А., Шлягин П.А., Моисеев А.А., Геликонов Г.В. // *ПТЭ*. 2021. № 5. С. 131.
<https://doi.org/10.31857/S0032816221040224>
9. Регулируемый усилитель AD8369.
<https://www.farnell.com/datasheets/2250847.pdf>
10. Управляемый фильтр низких частот MAX295.
<https://www.farnell.com/datasheets/1911554.pdf>
11. Микросхемы программируемой логики MAX7000.
<https://static.chipdip.ru/lib/223/DOC000223958>
12. Verilog Resources.
<https://verilog.com>
13. Среда разработки Quartus II Web Edition.
https://hamblen.ece.gatech.edu/UP3/quartusii_handbook.pdf
14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023616815 от 03.04.2023 г.