УДК 004.4:621.37

МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРА

Лапшенков Е.М., Волков В.Я.

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, e-mail: elapshenkov@mail.ru

Статья посвящена применению современных схемотехнических решений для миниатюризации узлов ЯМР-релаксометра. Предложена структурная схема цифрового генератора последовательностей радиочастотных импульсов на основе алгоритмов прямого цифрового синтеза (ПЦС). Данная схема реализована на миниатюрной элементной базе в виде программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), и проведено её тестирование методами компьютерного моделирования в системе ModelSim. В ходе тестирования показана возможность синтезировать последовательности радиочастотных импульсов с частотой несущей 20 МГц и фазами 0, π /2, π , 2π /3 при точности интервалов по шкале времени 6,25 нс. Предлагаемый генератор имеет возможность подстройки частоты несущей с шагом 0,125МГц. Планируется тестирование предложенных технических решений на реальных макетных образцах и определение возможности их использования в серийных аналитических приборах.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, аппаратура ЯМР, прямой цифровой синтез сигналов

MINIATURIZATION OF RF-PULSES SEQUENCE GENERATOR FOR NMR-RELAXOMETER

Lapshenkov E.M., Volkov V.Ya.

Moscow Technological University, Moscow, e-mail: elapshenkov@mail.ru

The article is dedicated to using of advanced circuit solutions for miniaturization of NMR-relaxometer modules. It is suggested the functional block diagram of RF pulses sequence digital generator based of direct digital synthesis (DDS) method. The circuit is created by miniaturized electronic elements such as Field Programmable Gate Array (FPGA) and then its testing was executed by computer modeling methods in ModelSim system. The computer modelling shown the capability to synthesis of RF pulses sequences having frequency 20 MHz and phases of 0, 90, 180, 270 degrees and 6,25ns precision of time intervals. The tune of generator is allowed by 0,125 MHz steps. The Authors is planning the practical testing of described engineering solutions and determining of possibility using their in serial analytical instruments.

Keywords: nuclear magnetic resonance, hardware of pulse NMR, direct digital synthesis (DDS)

Явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с момента своего открытия было положено в основу функционирования большого количества приборов, предназначенных для анализа состава и структуры веществ и материалов. Основной тенденцией развития этого направления было использование всё более сильных магнитов для увеличения разрешающей способности ЯМР-спектроскопии. Применение магнитов на основе сверхпроводящих соленоидов вывело ядерный магнитный резонанс в число базовых аналитических технологий 21 столетия, однако стоимость таких приборов оказывается чрезвычайно высокой.

Развитие микроэлектроники и появление новых магнитожёстких материалов в последние годы выявило новые возможности для создания малогабаритных и достаточно дешёвых ЯМР-анализаторов, пригодных для широкого применения в самых разных областях хозяйственной деятельности человека, включая научные исследования. Это уже позволило, наряду с уменьшением размеров и массы, приблизить возможности низкополевых приборов

к ЯМР-спектрометрам в сильных полях по целому ряду показателей. В настоящее время работы, направленные на миниатюризацию ЯМР приборов контроля, активно продолжаются [1–3]. В настоящей работе представлен вариант генератора последовательностей радиочастотных импульсов, основанный на применении алгоритма прямого цифрового синтеза и современной интегральной схемотехники.

Особенности импульсного ЯМР и требования к аппаратуре

Основными узлами ЯМР-релаксометра являются: источник постоянного магнитного поля H_0 , генератор радиочастотных импульсов; датчик, состоящий из катушки, включенной в состав колебательного контура, который используется как для создания импульсного магнитного поля H_1 в анализируемом образце, так и для приёма слабых сигналов ЯМР; усилитель и детектор сигналов ЯМР. Имеется также устройство управления, как правило взаимодействующее с компьютером.

Сформулируем требования для радиочастотного передатчика ЯМР-релаксометра [4, 5],

в состав которого входит генератор последовательности радиочастотных импульсов. Основное требование – способность создавать короткие радиочастотные импульсы высокой мощности в микросекундном диапазоне длительностей. Требуемая мощность зависит от объёма и свойств анализируемого образца и задаётся выходным усилителем передатчика. При этом время нарастания и спада огибающей импульса должно быть мало по сравнению с длительностью импульса. Частота несущей радиочастотного импульса должна быть равна резонансной частоте ядер атомов исследуемого вещества, которая определяется как частота прецессии Лармора f_{π} .

При анализе образцов в ЯМР-релаксометрах используются импульсные последовательности, которые накладывают требования на длительность и амплитуду импульсов, поворачивающих вектор ядерной намагниченности М на заданный угол (90°, 180° и др.) в зависимости от измеряемого показателя. Этот угол прямо пропорционален амплитуде ВЧ поля Н₁ и длительности импульса t, то есть, по существу, он определяется площадью импульса.

Обычно управляют длительностью импульса, так как её проще оперативно изменять. Следовательно, генератор передатчика должен иметь возможность формировать радиочастотные импульсы разной длительности с точной и управляемой выдержкой времени. А для методов на основе спинового эха требуется высокая точность временных интервалов и между импульсами.

Также в ряде методик [6, 7] требуются изменения фазы радиочастотных колебаний относительно опорной (начальной). То есть генератор передатчика ЯМР-релаксометра должен иметь возможность управления фазой радиочастотных колебаний.

В современных условиях передатчик ЯМР-релаксометра может быть построен полностью на основе аналоговой схемотехники или на основе цифровой и аналоговой схемотехники. Во втором случае на цифровую часть приходится генератор (синтезатор) последовательностей радиочастотных импульсов, а на аналоговую - фильтры и силовые выходные каскады. Такой подход позволяет исключить из конструкции некоторые аналоговые узлы, в частности для задачи разных длительностей импульса и для коммутации несущей сигнала. При использовании современных программируемых больших интегральных схем (БИС) это несомненно ведёт к уменьшению габаритов цифровой части конечного изделия, особенно если данная БИС будет основой и для других цифровых узлов прибора. Также существуют проблемы, связанные с уменьшением размеров аналоговых силовых узлов: передатчика и приёмника ЯМРрелаксометра, но их решение вынесено за рамки настоящей работы для будущих соисканий.

К цифровому генератору применяется ещё одно важное требование. Это наличие встроенного программируемого устройства управления, задающего параметры и последовательность импульсов. При этом устройство должно быть синхронизовано с опорной частотой генератора, а программирование должно осуществляться перед началом сеанса, так как управление непосредственно в ходе сеанса измерений может вносить дополнительную погрешность интервалов времени в импульсной последовательности.

Основные аспекты прямого цифрового синтеза

Рассматриваемый радиочастотный генератор может быть основан на алгоритме прямого цифрового синтеза (ПЦС) [8]. Классическая структурная схема такого генератора показана на рис. 1.

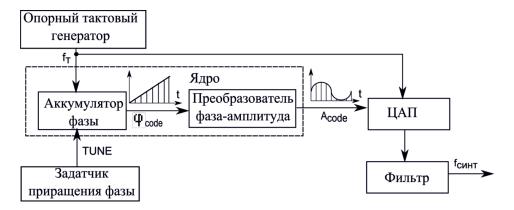


Рис. 1. Классическая структурная схема генератора на основе ПЦС

В ядро генератора входит аккумулятор фазы и преобразователь фаза-амплитуда. Аккумулятор фазы при каждом импульсе от опорного тактового генератора увеличивает своё значение на величину условного приращения фазы TUNE. Преобразователь фаза-амплитуда формирует на выходе значение, соответствующее входному коду фазы. Аккумулятор фазы должен переполняться при фазе 2π , то есть реальное значение фазы ϕ связано с кодированным значением фазы ϕ соде на выходе аккумулятора выражением

$$\varphi = 2\pi \frac{\varphi_{code}}{2^{N_{acc}}},\tag{1}$$

где N_{acc} – двоичная разрядность аккумулятора фазы. Исходя из этого преобразователь фаза-амплитуда можно реализовать на основе таблицы соответствия между кодированной амплитудой и кодированной фазой. Данное соответствие устанавливается формулой

$$A_{code} = \sin\left(2\pi \frac{\varphi_{code}}{2^{N_{acc}}}\right) (2^{N-1} - 1),$$
 (2)

где N — двоичная разрядность выхода преобразователя фаза-амплитуда и соответственно цифро-аналогового преобразователя ЦАП. При этом в реальной таблице обычно кодируют только первый квадрант (от 0 до π /2), остальные квадранты получают путём манипуляции со знаком и косвенным индексом обращения к таблице. Управление частотой генератора возможно при помощи изменения параметра приращения фазы TUNE. Частота на выходе генератора зависит от TUNE в соответствии с выражением

$$f_{\text{синт}} = f_{\text{т}} \frac{TUNE}{2^{N_{acc}}},\tag{3}$$

где $f_{_{\rm T}}$ — опорная тактовая частота. То есть частоту можно задавать с шагом $(f_{_{\it m}}/2^{\it Nacc})$ в пределах от 0 до $f_{_{\rm T}}/2$, в соответствии с теоремой Котельникова.

Цифровой синтез программируемых последовательностей РЧ импульсов в генераторе передатчика ЯМР-релаксометра

На основе ранее приведенных требований к генератору передатчика ЯМРрелаксометра предложена усложнённая схема ПЦС, ориентированная на генерацию последовательностей радиочастотных импульсов различной длительности и фазы с возможностью программирования. Данная схема приведена на рис. 2.

Помимо этого, для каждого импульса МПУ формирует код фазы синтезируемого радиочастотного импульса. Если требуется формировать фазу из набора 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$,

то для кода сдвига фазы достаточно только 2 бита, которые будут складываться с учётом переноса с двумя старшими битами кода фазы $\phi_{\rm code}$.

Реализация генератора на основе алгоритма прямого цифрового синтеза с использованием ПЛИС

Существуют современные примеры конструкций генераторов на основе ПЦС для ЯМР-релаксометров. Обычно они основаны на использовании специализированной микросхемы ПЦС, что требует присутствия внешнего быстродействующего управляющего устройства, например микроконтроллера или ПЛИС, для запуска и прекращения синтеза импульса [9, 10]. Так как управление запуском осуществляется командами через внешнюю шину, а микропроцессорное управляющее устройство может выполнять и другие подпрограммы, то не исключены ошибки формирования интервалов времени в последовательности импульсов. Другим вариантом является использование схемотехники на основе цифрового сигнального процессора (ЦСП, DSP) [11]. Однако при использовании ЦСП могут возникнуть указанные выше проблемы в том случае, если от него требуется параллельное выполнение нескольких операций по обработки потоков данных. В случае ЯМР-релаксометра, помимо синтеза передаваемого сигнала, требуется анализ принимаемого сигнала по определённым алгоритмам и поддержка внешних быстродействующих интерфейсов.

Возможность распараллеливания процессов обработки данных при условии их полной синхронизации даёт применение ПЛИС, тем более, что в рамках конструкции ЯМР-релаксометра на одной ПЛИС могут быть реализованы цифровые узлы генератора, приёмника и высокоскоростного интерфейса [12]. Недостатком конструкции в указанной работе является невозможность оперативной перенастройки параметров импульсной последовательности, так как она описывается VHDL кодом, загружаемым в процессе конфигурирования ПЛИС.

В рамках настоящей работы предлагается реализация генератора с ПЦС на ПЛИС Altera, лишённого данного недостатка. При этом для аппаратного описания каждого блока применён язык VerilogHDL[13], что позволяет легко перенести разработанное техническое решение на ПЛИС других производителей или заказать производство серии микросхем на базовом микрокристалле с требуемой конфигурацией.

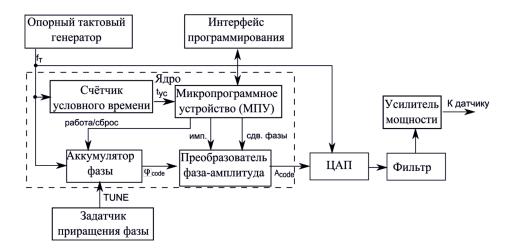


Рис. 2. Структурная схема генератора последовательностей РЧ импульсов на основе ПЦС

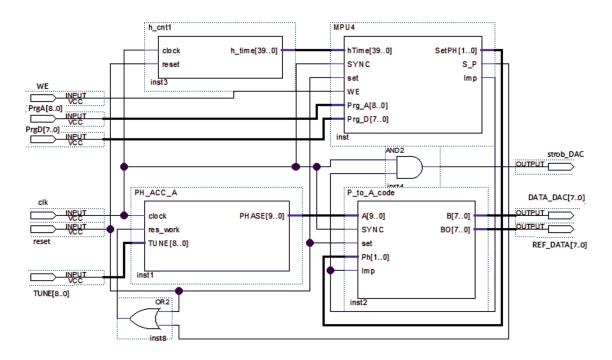


Рис. 3. Схема верхнего уровня генератора с ПЦС, сформированная в среде автоматизированного проектирования структур на ПЛИС Altera Quartus II Lite

Схема верхнего уровня, сформированная в среде автоматизированного проектирования структур на ПЛИС Altera Quartus II Lite, приведена на рис. 3.

Частота опорного тактового генератора выбрана 160 МГц. Блок аккумулятора фазы (PH_ACC_A) выполнен с разрядностью 10 двоичных разрядов. Через шину TUNE [8:0] задаётся код приращения фазы в каждом такте. В соответствии с выражением (3) это позволяет производить настройку частоты с шагом 0,156 МГц.

Преобразователь фаза-амплитуда реализован в виде блока P_to_A_code, таблица перекодирования в его составе синтезирована на основе выражения (2). Указанный блок имеет два восьмиразрядных выхода: В0 и В. Выход В0 запускается после запуска аккумулятора фазы, как правило, при первом импульсе, и с него снимается опорный цифровой сигнал с нулевой фазой. Выход В запускается только при появлении сигнала Ітр, его фаза определяется кодом на входе Ph [1:0].

Сигнал с выхода В подаётся на вход ЦАП через шину DATA_DAC, которая синхронизируется сигналом strob DAC.

Счётчик условного времени (блок h cnt) описан как классический двоичный счётчик с тактовой частотой $f_{T} = 160 \text{ M}$ Гц и количеством разрядов 40. Таким образом, квант условного времени t может быть рассчитан по формуле (4) и составит 6,25*10-9с (6,25 нс), а максимальная продолжительность времени программируемой последовательности t (рассчитывается по формуле (5)) составит 6871,94 c.

$$t_q = \frac{1}{f_r},\tag{4}$$

$$t_c = \frac{2^{N_{acc}}}{f_-},\tag{5}$$

где $N_{h\ cnt}$ — разрядность счётчика. В предложенном варианте МПУ (блок MPU4) позволяет производить программирование последовательности импульсов с возможностью выбора фазы несущей для каждого радиочастотного импульса из ряда $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Количество импульсов в последовательности определяется объёмом памяти конкретной ПЛИС. Запуск и остановка со сбросом аккумулятора фазы осуществляется через линию S P,

а установка фазы через порт SetPh[1:0], запуск синтеза импульсов производится через линию Ітр. МПУ имеет интерфейс программирования, реализованный в виде шин PrgA(адрес), PrgD(данные), WE(разрешение записи), который позволяет программировать последовательности импульсов, записывая их параметры в соответствующие регистры.

Перед созданием макетного образца с указанными параметрами экономически целесообразно произвести компьютерное моделирование выполнения генератором заданных функций. Для этих целей использована система моделирования Model-Sim [14], совместимая со средой Quartus II Lite с возможностью визуализации результатов. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 представлена последовательность из нескольких импульсов разной ширины. На рис. 5 представлены импульсы с разной фазой относительно опорного сигнала, а именно $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Стоит отметить, что масштабы временных интервалов оптимизированы для визуализации возможностей предлагаемого генератора и могут несколько отличаться от применяемых в практических методиках ЯМРспектроскопии.

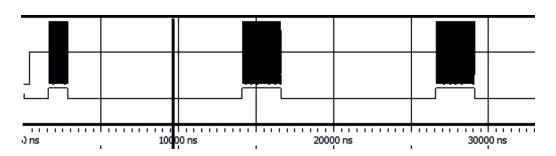


Рис. 4. Последовательность радиочастотных импульсов разной ширины, полученная при моделировании генератора в среде ModelSim

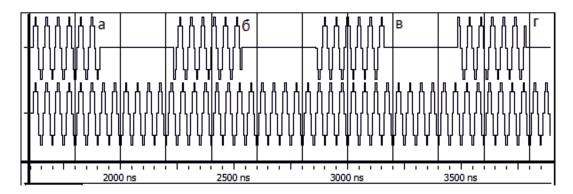


Рис. 5. Пример генерации последовательности радиочастотных импульсов (вверху) с частотой $20~M\Gamma$ ц и фазой $0~(a),~\pi/2~(6),~\pi~(8),~3\pi/2~(2)$ относительно опорной несущей (внизу)

Заключение

В настоящей работе предложена структурная схема генератора последовательностей радиочастотных импульсов для ЯМР-релаксометра, реализованная с использованием ПЛИС. Методами компьютерного моделирования показана возможность генерации радиочастотных импульсов различной длительности с достаточно точной выдержкой по времени и возможность задавать фазу несущей для конкретного радиочастотного импульса, что требуется в многоимпульсных методиках измерения времён ЯМРрелаксации. Частота несущей также может быть изменена без переконфигурирования ПЛИС, то есть генератор может быть использован для приборов, регистрирующих времена релаксации ЯМР разного типа атомных ядер в образце.

Возможно применить предложенную структуру генератора последовательностей радиочастотных импульсов при проектировании цифровой части приёмника и передатчика ЯМР-релаксометра на одной микросхеме ПЛИС, что позволит миниатюризировать данный прибор.

Список литературы

- 2. Zalesskiy S.S., Danieli E., Blumich B., Ananikov V.P. Miniaturization of NMR Systems: Desktop Spectrometers, Microcoil Spectroscopy, and «NMR on a Chip» for Chemistry,

- Biochemistry, and Industry // Chem. Rev. -2014. Vol. 114. P. 5641–5694.
- 3. Волков В.Я., ЯМР в низких магнитных полях. Состояние и перспективы применения // Приборы. 2016. N_0 9. C. 21–27
- 4. Блюмих Б. Основы ЯМР для учёных и инженеров / Б. Блюмих. М.: Техносфера, 2011.-256 с.
- 5. Импульсная и Фурье спектроскопия ЯМР / Т. Фаррар, Э.Беккер. М.: Мир, 1973. 167 с.
- 6. Meiboom S., Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times // Rev Sci Instrum. 1958. № 29. P. 688–691.
- 7. Levitt M.H. Composite Pulses // Encyclopedia of Magnetic Resonance. 1996. P. 1396–1410.
- 8. Иванов Д.В., Иванов В.А., Чернов А.А. Теоретические основы метода прямого цифрового синтеза радиосигналов для цифровых систем связи // Вестник ПГТУ. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 1. С. 3–34.
- 9. Габидуллин Д.Д., Гафиятуллин Н.М., Крылатых Н.А., Фаттахов Я.В. Прецизионный синтезатор частот с прямым цифровым синтезом для низкополевого магнитнорезонасного томографа // Приборы и техника эксперимента. -2012. -№ 4. C. 49–51.
- 10. Kazuyuki Takeda. A highly integrated FPGA-based nuclear magnetic resonance spectrometer // Rev. Sci. Instrum. 2007. Vol. 78. P. 033103.
- 11. Aktham Asfour, Kosai Raoof, Jean-Paul Yonnet. Software Defined Radio (SDR) and Direct Digital Synthesizer (DDS) for NMR/MRI Instruments at Low-Field // Sensors. 2013. Vol. 13. P. 16245–16262.
- 12. Preeti Hemnani, A.K. Rajarajanb, Gopal joshi, S.V.G. Ravindranath. FPGA based RF pulse generator for NQR/NMR spectrometer // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 93. P. 161–168.
- 13. Соловьев В.В. Основы языка проектирования цифровой аппаратуры Verilog / В.В. Соловьев. М.: Горячая линия Телеком, 2014.-208 с.
- 14. ModelSim. ASICandFPGAdesign [Электронный ресурс]. режим доступа: https://www.mentor.com/products/fv/modelsim/.