

ПРЕЦИЗИОННЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ СИНТЕЗОМ ДЛЯ НИЗКОПОЛЕВОГО МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА

© 2012 г. Д. Д. Габидуллин, Н. М. Гафиятуллин, Н. А. Крылатых, Я. В. Фаттахов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КНЦ РАН

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

Поступила в редакцию 22.08.2011 г.

Описывается синтезатор частот радиоспектрометра магнитно-резонансного томографа (м.р.т.) с напряженностью основного магнитного поля 0.06 Тл. Синтезатор построен на основе программируемой логической интегральной схемы и микросхемы прямого цифрового синтеза. Синтезатор способен работать в диапазоне до 70 МГц с шагом перестройки 3 мкГц, что позволяет использовать его в м.р.т.-системах с напряженностью основного магнитного поля до 1.5 Тл. Устройство позволяет хранить в своей оперативной памяти до 16348 значений частоты, а переключение осуществляется посредством логического сигнала, источником которого может служить, например, программатор импульсных последовательностей радиоспектрометра. Скорость переключения частот составляет не менее 1 кГц. Загрузка синтезатора происходит через стандартный интерфейс USB 2.0.

В экспериментах по ядерному магнитному резонансу (я.м.р.), электронному парамагнитному резонансу (э.п.р.), ядерному квадрупольному резонансу (я.к.р.) и магнитно-резонансной томографии (м.р.т.) блок синтезатора частот используется как для радиочастотного возбуждения исследуемых образцов, так и для детектирования электромагнитных сигналов, излученных образцом. В м.р.т. в отличие от я.м.р.-, э.п.р.- и я.к.р.-экспериментов требуется высокоскоростное переключение частот в заданном частотном диапазоне.

Статья посвящена разработке синтезатора частот радиоспектрометра томографа ТМР-0.06-КФТИ с напряженностью основного магнитного поля 0.06 Тл. Частота ларморовой прецессии для протонов в таком поле равна 2.5 МГц. Магнитное поле в томографе ТМР-0.06-КФТИ создается при помощи электромагнита. Один из недостатков магнита этого типа – аппаратные сложности долговременной стабилизации магнитного поля. Это обусловлено тем, что проводник электромагнита обладает температурным коэффициентом сопротивления, поэтому изменения температуры магнита вызывают дрейф напряженности основного магнитного поля. А это, в свою очередь, приводит к изменению основной рабочей частоты я.м.р.

Одним из способов решения этой проблемы является подстройка частоты синтезатора спектрометра под текущую рабочую частоту. К тому же, нередко в рабочую полосу просачиваются промышленные электромагнитные помехи, что ведет к ухудшению коэффициента сигнал/шум. В этом случае также необходима отстройка рабочего диапазона частот в более “чистую” полосу пу-

тем перестройки частоты синтезатора и изменения тока электромагнита.

В нашем случае к синтезатору предъявляются следующие требования:

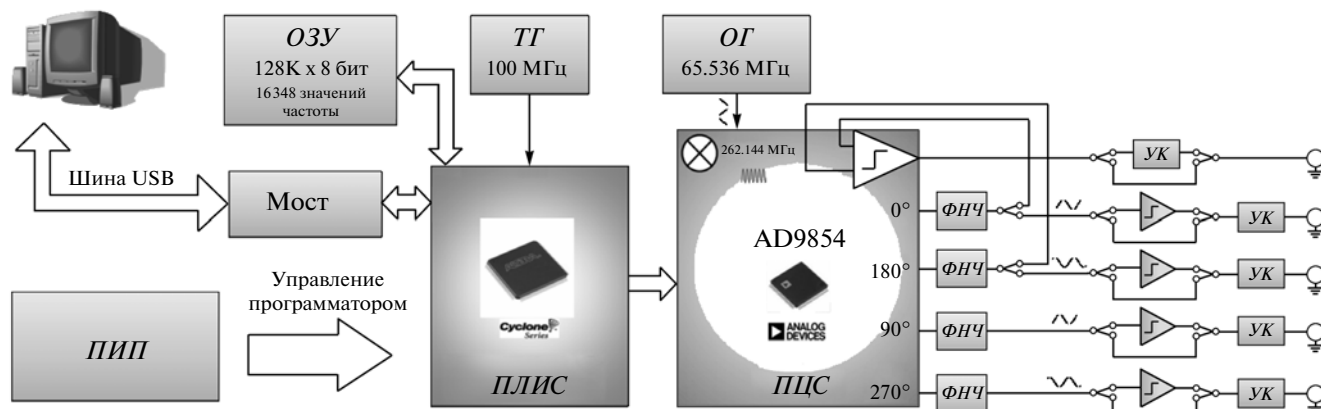
- основная рабочая частота 2.5 МГц;
- диапазон перестройки частоты 500 кГц;
- скорость переключения частот не менее 1 кГц.

Для разработки синтезатора частот был выбран метод прямого цифрового синтеза [1], так как он обладает следующими преимуществами:

- высокое разрешение по частоте (до 48 бит);
- перестройка частоты ограничена практически только быстродействием цифрового управляющего интерфейса и проходит без разрыва фазы, без выбросов и других аномалий, связанных с временем установления;
- цифровой интерфейс позволяет организовать гибкое управление параметрами выходного сигнала.

Блок-схема синтезатора представлена на рисунке. Разработанное устройство построено на основе микросхемы прямого цифрового синтеза (ПЦС) фирмы Analog Devices AD9854 [2]. Максимальная частота опорного генератора для этой микросхемы составляет 300 МГц, что позволяет генерировать частоты до 70 МГц. Следует отметить, что этот факт допускает использование разработанного синтезатора частот в м.р.т.-системах с напряженностью основного магнитного поля до 1.5 Тл.

Частотное разрешение составляет 48 бит, что в переводе на частоту составляет примерно 1 мкГц при использовании высокостабильного генератора тактовых импульсов на 300 МГц. Данный факт позволяет проводить периодическую прецизион-



Принципиальная блок-схема синтезатора частот. *ПЛИС* – программируемая логическая интегральная схема; *ПИП* – программатор импульсных последовательностей; *ПЦС* – микросхема прямого цифрового синтеза; *ОЗУ* – оперативное запоминающее устройство; *ТГ* – тактовый генератор; *ОГ* – опорный генератор; *УК* – усилительный канал; *ФНЧ* – фильтр низких частот.

ную подстройку рабочей частоты под текущее основное магнитное поле. Микросхема имеет четыре аналоговых выхода синусоидальных сигналов, сдвинутых друг относительно друга на 90° .

На выходе каждого канала установлен эллиптический фильтр низких частот 7-го порядка с частотой среза 4 МГц (определяется в зависимости от рабочей частоты и рабочей полосы). Он необходим для подавления лишних высокочастотных гармоник, возникающих при использовании метода прямого цифрового синтеза.

Наличие внешних компараторов AD8611 дает возможность преобразования выходных сигналов в прямоугольные импульсы, причем форма сигнала каждого канала выбирается индивидуально [3]. Также имеется встроенный компаратор в AD9854. Для него сделан отдельный выходной разъем. Таким образом, синтезатор имеет 5 рабочих каналов. На выходе каждого канала установлены усилительные каскады (*УК*), собранные на высокочастотных биполярных транзисторах.

Для работы AD9854 необходимо записать цифровой код частоты во внутренние регистры микросхемы и выполнить операцию обновления активного кода частоты. Для этого чаще всего используются программируемые логические интегральные схемы (*ПЛИС*) либо микроконтроллеры. Использование *ПЛИС* в нашем случае дает некоторые преимущества: эти схемы обладают большим быстродействием, что зачастую критично для физических экспериментов.

Второе, и наиболее важное, преимущество заключается в том, что время обработки и выполнения определенной команды постоянно и определяется частотой внешнего тактового генератора и микропрограммным обеспечением (“прошивкой”) самой *ПЛИС*, написанным разработчиком. Это

позволяет осуществить точную синхронизацию работы отдельных модулей устройства.

Микропрограммное обеспечение *ПЛИС* выполняет следующие функции: распределение потоков данных внутри устройства, запись/чтение оперативного запоминающего устройства (*ОЗУ*), инициализация и настройка рабочего режима микросхемы *ПЦС*, запись кода частоты в микросхему *ПЦС*, обработка команд программатора импульсных последовательностей (*ПИП*) радиоспектрометра. В данной работе используется *ПЛИС* MAX II фирмы Altera [4].

Функцию хранения цифровых кодов частот, необходимых для эксперимента, выполняет микросхема *ОЗУ* фирмы Samsung K6R1008V1D-JC10, которая обладает высоким быстродействием функций записи и чтения (порядка 10 нс через параллельный интерфейс) [5]. Так как ширина кода частоты для AD9854 составляет 48 бит, а размер ячейки памяти *ОЗУ* 8 бит, то для хранения одного значения частоты необходимо использовать 6 ячеек памяти. При этих условиях *ОЗУ*, обладая объемом 1 Мбит, позволяет хранить до 16348 значений частот.

Работа *ПЛИС* тактируется кварцевым генератором (*ТГ*) с частотой 100 МГц, что обеспечивает достаточное быстродействие системы. Так как стабильность выходной частоты микросхемы прямого цифрового синтеза определяется параметрами тактового генератора, микросхема *ПЦС* тактируется высокостабильным опорным генератором (*ОГ*) с нестабильностью частоты $2 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне рабочих температур и частотой 65.536 МГц. Впоследствии эта частота умножается на 4 при помощи внутреннего умножителя частоты микросхемы *ПЦС*, и таким образом частота тактирования *ПЦС* достигает 262.144 МГц.

Управление синтезатором может осуществляться как через программатор импульсных последовательностей *ПИП* спектрометра, так и через USB-интерфейс персонального компьютера. В первом случае под управлением подразумевается возможность переключения частот при помощи команд инкремента, декремента и сброса индекса активной ячейки памяти *ОЗУ* с немедленной перезаписью в микросхему *ПЦС* значения новой активной ячейки. Управление от программатора осуществляется посредством обычного логического сигнала.

Связь с персональным компьютером осуществляется через универсальный последовательный интерфейс (USB). Для этого в устройстве используется микросхема преобразователя интерфейсов (мост), которая работает в режиме преобразования параллельного интерфейса в USB и обратно [6]. Микропрограммное обеспечение реализует выполнение следующих команд:

1) инкремент индекса ячейки памяти частоты, считывание кода значения частоты из этой ячейки, запись в *ПЦС*;

2) декремент индекса ячейки памяти частоты, считывание кода значения частоты из этой ячейки, запись в *ПЦС*;

3) сброс индекса ячейки памяти частоты, считывание кода значения частоты из этой ячейки, запись в *ПЦС*;

4) запись/чтение кода первых двух байтов значения частоты в/из текущую ячейку памяти частоты;

5) запись/чтение кода средних двух байтов значения частоты в/из текущую ячейку памяти частоты;

6) запись/чтение последних двух байтов значения частоты в текущую ячейку памяти частоты, отведенную для хранения частот, запись значения частоты текущей ячейки в *ПЦС*;

7) установка индекса памяти частоты, считывание кода значения частоты из этой ячейки, запись в *ПЦС*.

Вызов этих команд осуществляется через интерфейс USB. Как уже было описано выше, первые три команды могут вызываться также и с программатора импульсных последовательностей.

В результате измерений было получено, что синтезатор обладает следующими характеристиками: максимальный диапазон перестройки 0–70 МГц (в нашем случае наибольшая частота определяется фильтром низких частот и равна 4 МГц); разрешение по частоте 3 мкГц; нестабильность выходной частоты: $2 \cdot 10^{-6}$; частота переключения частот не более 1 кГц; число хранимых в *ОЗУ* частот – 16348; наличие четырех выходных каналов, сдвинутых друг относительно друга на 90° ; выходное сопротивление каналов 50 Ом; возможность генерации прямоугольного сигнала; взаимодействие с персональным компьютером по USB-интерфейсу.

Разработанная система успешно эксплуатируется в составе магнитно-резонансного томографа ТМР-0.06-КФТИ. Данная система может использоваться также как обычный генератор частот для лабораторных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Л. // Электроника НТБ. 2004. № 3. С. 38.
2. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9854.pdf
3. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8611_8612.pdf
4. <http://www.altera.com/products/devices/cpld/max2/mx2-index.jsp>
5. http://www.samsung.com/global/system/business/semiconductor/product/2007/6/11/HighSpeedSRAM/AsyncFastSRAM/1Mbit/K6R1008V1D/ds_k6r1008v1d_rev30.pdf
6. http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT245BM.pdf