

УДК 621.396

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО И ЦИФРОАНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

А.Г. Арзуманян, О.А. Гомцяян, О.Ж. Севоян

Национальный политехнический университет Армении

Рассмотрены возможность и принципы настройки высокочастотного (Digital Upconverter - DUC) и цифроаналогового преобразователей (ЦАП). Исследованы проблемы интерполяции и фильтрации сигнала. Приведена программа регулирования высокочастотного преобразователя и ЦАП в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), с помощью которой реализуется формирование высокочастотного модулированного сигнала. Описаны принципы работы частотного синтезатора и смесителя для перехода в сверхвысокочастотный диапазон и основы сверхвысокочастотной фильтрации. Полученные на основе экспериментальных измерений результаты позволяют сделать вывод, что разработанная программа применима в спутниковых передатчиках и в других программно-определяемых передающих системах.

Ключевые слова: высокочастотный преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, программируемая логическая интегральная схема, регулирование, система SDR, регистр, интерполяция.

Введение. Как известно, высокочастотные преобразователи предназначены для переноса частоты сигнала в другой частотный диапазон и обычно состоят из смесителя и локального осциллятора [1]. ЦАП предназначены для преобразования цифрового сигнала в аналоговый. Как высокочастотные, так и цифроаналоговые преобразователи применяются во всех передающих системах для передачи сигналов в эфир [2].

В настоящее время эти преобразователи имеют большое применение в передатчиках, где получение сигналов реализуется с помощью программы. В тех передатчиках, где обработка, кодирование и модуляция сигналов реализуются программным способом, т.е. в системах SDR (Software Defined Radio), применяют высокочастотные и цифроаналоговые преобразователи для получения аналогового сигнала и его передачи в эфир.

Постановка задачи. Основной целью работы является настройка ЦАП с высокочастотным цифровым преобразователем так, чтобы на выходе получить сигнал с программно-определяемой частотой и модуляцией. Решение данной задачи позволит применить разработанную программу в системах хранения данных реального времени со спутниковым передатчиком, реализующих регистрацию данных, получаемых от аналоговых и цифровых датчиков, а также хранение и передачу информации на спутники. В этих системах имеется

необходимость обеспечить высокоскоростную обработку полученных данных, кодирование, хранение и передачу на спутники с высокой точностью и стабильностью по времени. Здесь основной проблемой является высокоскоростное считывание и регистрация настроечных значений регистров в ЦАП и в цифровом преобразователе частоты (в дальнейшем ЦАП с ПЧ). Поскольку ПЛИС обеспечивает сверхвысокоточную и сверхвысокоскоростную обработку и регистрацию данных, следовательно, использование и применение программы, полученной в ПЛИС, позволит регистрировать точные данные в регистрах ЦАП с ПЧ и передавать сигнал.

В настоящее время в подобных устройствах используются высокочастотные цифроаналоговые преобразователи, на выходе которых получается сигнал с одним типом модуляции и с ограниченным частотным диапазоном. Поскольку спутники работают в разных частотных диапазонах и с разными типами модуляции, появляется необходимость соответствующих изменений в системе. Эти изменения можно избежать с помощью программно-определяемой системы передачи.

Первоначальной задачей исследования была точная регистрация значений в настроечных регистрах ЦАП с ПЧ при помощи ПЛИС [3]. Для решения этой задачи использовался протокол SPI (Serial Peripheral Interface), который передает настроечные значения в ЦАП с ПЧ с высокой скоростью (10 Мбит/с). Чтобы обеспечить передачу модулированного сигнала и входных условий высокочастотного преобразователя, необходимо было произвести интерполяцию сигнала с частотой выборки до 4MSPS (Mega Samples Per Second). Для решения этой задачи была использована программа "FIR Compiler" от "Xilinx Technology", которая позволяет выбрать любые настройки для интерполяции и фильтрации в ПЛИС [4]. Таким образом, использование ПЛИС дает возможность выбирать частоту и тип модуляции сигнала программным способом на выходе преобразователя.

Принцип работы. В блок-схеме на рис. 1 представлен принцип регистрации настроечных значений в регистрах ЦАП с ПЧ.



Рис. 1. Последовательность регистрации значений в ЦАП с преобразователем частоты

Как видно из рис. 1, кодирование данных, модуляция и формирование сигнала происходят в ПЛИС, а затем выполняется передача данных в другую часть программы, где реализуются интерполяция и фильтрация (FIR-Finite Impulse Response-фильтр). Настраиваемые значения ЦАП с ПЧ и сформированный сигнал от ПЛИС передаются в блок ЦАП с ПЧ с помощью протокола SPI, в результате которого получается программно-определяемый аналоговый сигнал. При помощи разработанной программы обеспечивается возможность изменять и записывать другие значения частот, а также тип модуляции в ПЛИС в настраиваемых регистрах ЦАП с ПЧ.

Вышеописанный подход позволяет производить параллельную обработку настраиваемых значений, формирование сигнала и синхронизированный переход данных в ЦАП с помощью протокола SPI, в результате которого максимально сокращается время обработки (до микросекунд).

Получаемый битовый поток для настройки регистров ЦАП с ПЧ, протокол SPI, кодирование, модуляция сигнала и передача данных от ПЛИС к ЦАП были реализованы с помощью sbRIO-9606 с программным обеспечением, написанным в среде LabVIEW [5].

На рис. 2 изображено окно программы, реализующей интерполяцию сигнала при помощи "FIR Compiler" в ПЛИС.

В правой части окна расположено окошко для ввода изменений параметров интерполяции и фильтрации (на рисунке представлено только первое окно для ввода параметров), в левой части выводится изображение выходной амплитудно-частотной характеристики, соответствующей введенным параметрам интерполяции и фильтрации.

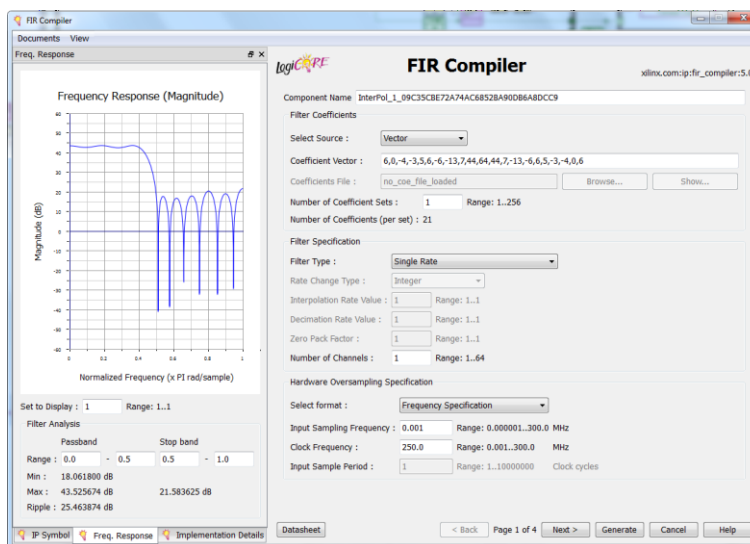


Рис. 2. Окно настройки интерполяции и фильтрации в "FIR Compiler"

Для проверки точности полученных результатов были выполнены эксперименты, во время которых сравнивались значения интерполированного сигнала на выходе ПЛИС с симулированными значениями сигналов при помощи разных программ (LabVIEW, MatLab). Результаты сравнения показали, что использование "FIR Compiler" в ПЛИС однозначно решает задачи с интерполяцией и фильтрацией и обеспечивает входные требования ЦАП с ПЧ.

Экспериментальные данные. Основной задачей экспериментальных измерений является получение сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала, где изменение частоты и тип модуляции сигнала должны определяться и изменяться программным способом.

Для проведения экспериментальных измерений использовались цифро-аналоговый преобразователь AD9957 (в состав которого входит высокочастотный цифровой преобразователь), синтезатор частот ADF4360-0BCPZ и смеситель MAMX-007238-CM25MH для получения сверхвысокочастотного сигнала.

На вход ЦАП AD9957 подается обработанный и модулированный цифровой I/Q сигнал из ПЛИС, а на выходе получается аналоговый высокочастотный сигнал. В настроечные регистры ЦАП записываются настроечные значения из ПЛИС с помощью протокола SPI. Изменяя настроечные значения, имеем возможность получить требуемый сигнал с частотой до 400 МГц. Адреса, значения и количество регистров для разных ЦАП могут быть разными, но реализационная основа настройки регистров с точки зрения программы в ПЛИС остается неизменной.

У выбранного ЦАП есть встроенный генератор с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), на вход которого подается опорный сигнал с внешнего кварцевого генератора ABM11-25.000MHZ-D2X-T3. Управление ФАПЧ осуществляется от ПЛИС через протокол SPI. Таким образом, при помощи настройки ЦАП входной I/Q сигнал после умножения с выходным сигналом ФАПЧ преобразуется в промежуточный высокочастотный выходной сигнал [6].

На втором этапе применялось СВЧ преобразование выходного промежуточного высокочастотного сигнала ЦАП и выходного сигнала синтезатора частоты при помощи смесителя.

Настройка регистров синтезатора частот ADF4360-0 также выполнялась в ПЛИС. Для передачи настроечных значений использовался протокол SPI. Здесь выходная частота сигнала настраивалась при помощи записи данных в соответствующие регистры синтезатора так же, как и в ЦАП, а в качестве опорного генератора использовался кварцевый генератор DV75C TCXO.

В результате экспериментов была разработана и предложена блок-схема программно-определяемого СВЧ передатчика (рис. 3).

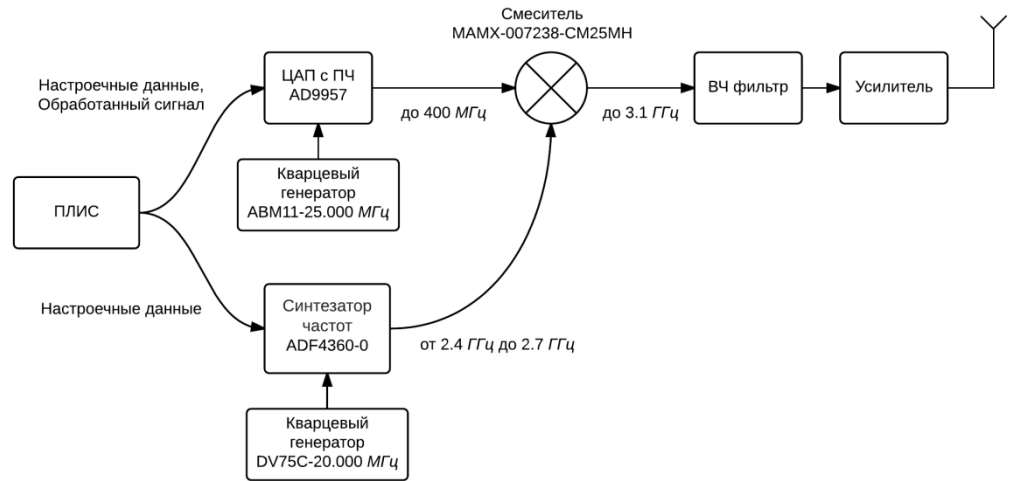


Рис. 3. Предложенная блок-схема программно-определяемого передатчика

Из рис. 3 видно, что настроечные данные и обработанный сигнал поступают на входы ЦАП и частотного синтезатора с ПЛИС. Кварцевые генераторы подключены к входам программно-настраиваемых генераторов, после чего на выходе ЦАП получается высокочастотный сигнал промежуточной частоты, а на выходе частотного синтезатора - СВЧ гетеродинный сигнал. С помощью смесителя получается программно-определяемый СВЧ сигнал, который после фильтрации и усиления можно передавать в эфир.

Формула высокочастотного преобразования определяется в виде

$$X_{\text{вых}}(f) = X(f + f_n) + X(f - f_n), \quad (1)$$

где $X(f + f_n)$ и $X(f - f_n)$ - составляющие СВЧ сигнала на выходе смесителя; f и f_n - частоты сигналов на выходе ЦАП и гетеродина соответственно; $X_{\text{вых}}(f)$ - выходной сигнал.

Для экспериментального получения СВЧ сигнала на частоте 2,690 ГГц регистры ЦАП AD9957 настраивались так, что на выходе ЦАП с ПЧ получился сигнал с частотой 290 МГц, а на выходе частотного синтезатора ADF4360 - с частотой 2,4 ГГц. Последний для смесителя использовался как гетеродинный сигнал, а выходной сигнал ЦАП - как полезный сигнал промежуточной частоты.

Сигнал промодулирован двоичной фазовой манипуляцией (BPSK) со скоростью передачи 4,8 Кб/с.

На рис. 4 приведен спектр сигнала с модуляцией BPSK на частоте 2,690 ГГц, полученного на выходе передатчика.

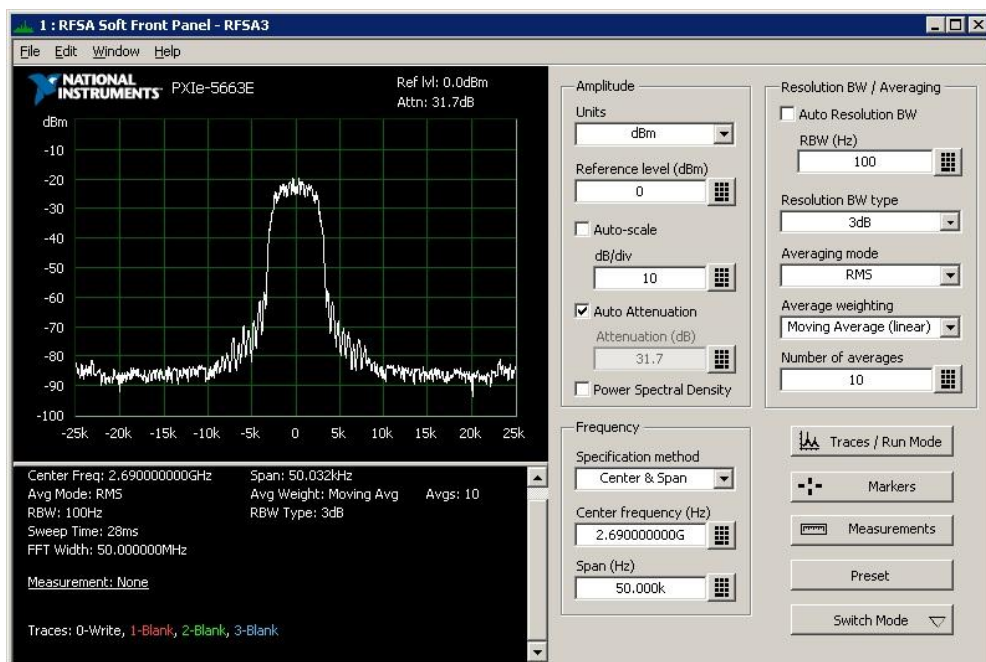


Рис. 4. Спектр СВЧ сигнала на частоте 2,690 ГГц

Для получения спектра сигнала использовался анализатор NI PXIe-5663E от компании "National Instrument". На рис. 4 изображены спектр сигнала, уровень мощности и смещения частоты. Данный сигнал после внешнего усиления можно передавать спутникам.

Заключение. Осуществлены настройка и реализация высокочастотного и цифроаналогового преобразователей с помощью ПЛИС. Экспериментальные измерения показали, что при помощи совместного использования программно-настроечного ЦАП с высокочастотным цифровым преобразователем и частотного синтезатора возможно сгенерировать СВЧ сигнал с программно-определяемой частотой и различными типами модуляции. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная программа применима в спутниковых передатчиках и в других программно-определяемых передающих системах.

Литература

1. **Fa-Long Luo.** Digital Front-End in Wireless Communications and broadcasting.– Cambridge University Press, October, 2011. - 788 p.
2. **Rudy J. van de Plassche.** CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-To-Analog Converters. – Springer US, December, 2010. - 588 p.
3. **Clive Maxfield Burlington.** FPGAs Instant Access. - USA, UK, August, 2008.- 204 p.

4. **Roger Woods, John McAllister, Gaye Lightbody, Ying Yi.** FPGA-based Implementation of signal processing systems. – John Wiley & Sons, Ltd., Publication, United Kingdom, 2008. - 170 p.
5. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/210003>.
6. <http://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/AD9957.pdf>.

*Поступила в редакцию 30.02.2015.
Принята к опубликованию 22.05.2015.*

ԹՎԱ-ԱՆԱԼՈՒԳԱՅԻՆ ԵՎ ԲԱՐՁՐ ՀԱՃԱԽԱԿԱՆԱՅԻՆ ՁԵՎԱՓՈԽԻՉՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄԸ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՎՈՂ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՏՐԱՄԱԲԱՆԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՅԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Հ.Գ. Արզումանյան, Հ.Ա. Գոմցյան, Օ.Ճ. Սևոյան

Դիտարկվել են թվա-անալոգային (ԹԱՁ) և բարձր հաճախականությամբ ձևափոխիչների գերարագ և ճշգրիտ կարգավորման հնարավորությունն ու սկզբունքները: Ուսումնասիրվել են թվային ազդանշանի միջարկման (interpolation) և զտման հիմնախնդիրները: Բերված է ծրագրավորվող ինտեգրալ տրամաբանական սխեմայում (FPGA) մշակված բարձր հաճախականային ձևափոխիչի և ԹԱՁ-ի կարգավորման ծրագիրը, որի միջոցով ստացվում են բարձր հաճախությամբ մոդուլված ազդանշանները: Գերբարձր հաճախականային տիրույթ անցման համար դիտարկվել են հաճախականային սինթեզատորի և խառնիչի աշխատանքային սկզբունքներն ու գերբարձր հաճախականային զտումը: Փորձնական չափումների հիման վրա ստացված արդյունքները թույլ են տալիս եզրակացնել, որ մշակված ծրագիրը կիրառելի է արբանյակային հաղորդիչներում և այլ ծրագրապես որոշվող հաղորդիչ համակարգերում:

Առանցքային բառեր. բարձր հաճախականային ձևափոխիչ, թվա-անալոգային ձևափոխիչ, FPGA, կարգավորում, SDR համակարգ, ռեգիստր, միջարկում:

OPERATION OF HIGH-FREQUENCY AND DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS BY A FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY

H.G. Arzumanyan, H.A. Gomtsyan, O.J. Sevoyan

The possibility and principles of adjusting a digital upconverter (DUC) and a digital-to-analog converter (DAC) are considered. The problems of the signal interpolation and filtration are studied. The program for configuring the DUC and the DAC in the field-programmable gate array (FPGA) is introduced by means of which, the formation of a high-frequency modulated signal is performed. The operation principles of a frequency synthesizer and a mixer for the transition to an ultra-high frequency range and the bases of ultra-high frequency filtration are considered. The results obtained by experimental measurements allow to conclude that the developed program can be applied in satellite transmitters and other software-defined transmitting systems.

Keywords: digital upconverter, digital-to-analog converter, FPGA, configuration, SDR system, register, interpolation.