

УДК 621.373.5

ПРОГРАММЫ ПОИСКА ОБЛАСТЕЙ ЧАСТОТ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ПАРАЗИТНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В СПЕКТРАХ ВЫХОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦВС

А.В. Голубков, научный сотрудник НИО-33 МТУСИ; andrew@radiocomp.net

В.Г. Голубков, начальник лаборатории НИО-33 МТУСИ

В.Н. Кочемасов, начальник отдела НИО-33 МТУСИ, к.т.н.

Е.В. Янковский, инженер-электроник НИО-33 МТУСИ

Ключевые слова: цифровые вычислительные синтезаторы частот, паразитные спектральные составляющие, синтезируемые сигналы, тактовая частота.

Введение. Цифровые вычислительные синтезаторы частот (ЦВС) – удобный, гибкий и сравнительно недорогой инструмент для построения систем формирования колебаний и сигналов. Основные преимущества ЦВС заключаются в субгерцовой точности установки частоты и практически мгновенном переключении между синтезируемыми частотами. Один из основных недостатков ЦВС – наличие в спектре выходного сигнала паразитных спектральных составляющих (ПСС).

В статье проведен анализ источников возникновения ПСС в спектре ЦВС и приведены рекомендации по выбору полос синтезируемых частот на выходе ЦВС, в которых обеспечиваются низкие уровни ПСС. Кроме того, дано описание разработанных авторами программных продуктов, позволяющих обнаружить интервалы частот в спектре выходного сигнала ЦВС, опасные с точки зрения возникновения ПСС, а также выбрать участки с минимальными уровнями ПСС для заданных тактовой частоты, архитектуры ЦВС и диапазона синтезируемых частот.

Развитие технологий ЦВС. Первые публикации, посвященные ЦВС, датируются началом 70-х годов прошлого века [1]. За прошедшее время наблюдалось бурное развитие этого класса источников сигналов. К настоящему моменту большая часть ЦВС строится в виде сверхбольших интегральных схем (СБИС), а тактовые частоты ЦВС достигли значений в единицы гигагерц [2].

Развитие технологий построения ЦВС привело к значительному снижению уровней ПСС в спектрах их

выходных сигналов. Например, в микросхеме 1508ПЛ8Т [3, 4] уровень ПСС составляет менее минус 80 дБ по отношению к синтезируемому сигналу в правильно выбираемых узких полосах и менее минус 50 дБ во всей полосе синтезируемых частот. Для микросхемы AD9858 фирмы Analog Devices уровень ПСС полосе ± 1 МГц, приведенный в документации [5] для нескольких значений частот синтезируемых сигналов, составляет менее минус 80 дБ, а в широкой полосе – не выше минус 52 дБ по отношению к синтезированному сигналу. Тем не менее, даже такой низкий уровень ПСС для некоторых приложений ЦВС может оказаться недостаточным.

Основные источники возникновения ПСС достаточно подробно описаны в [6–8]. К появлению ПСС в спектре выходного сигнала ЦВС приводят:

- дискретизация – возникновение копий синтезируемого сигнала относительно гармоник тактовой частоты;
- конечная разрядность и неидеальность выходного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП);
- усечение разрядности фазы.

В последнее время для достижения высоких тактовых частот все чаще применяется параллельная схема построения

ЦВС [9]. При этом в технической документации на СБИС ЦВС информация об использовании такой структуры обычно не приводится. Выводы о структуре СБИС ЦВС и числе параллельных каналов можно сделать только по таким косвенным признакам, как наличие дополнительных ПСС в областях частот, близких к половине или четверти тактовой частоты.

Разработанные авторами программы позволяют получать картину распределения ПСС с учетом архитектуры построения ЦВС.

Источники возникновения ПСС. Рассмотрим подробнее приведенные выше источники возникновения ПСС. Из-за цифровой природы ЦВС в спектре выходного сигнала появляются составляющие на частотах:

$$F_{\text{псс}} = mF_T \pm F_c, \quad (1)$$

где F_T – тактовая частота ЦВС; F_c – синтезируемая частота; m – целое число. Следует отметить, что в общем случае уровни этих паразитных составляющих относительно синтезируемого сигнала высоки и определяются весовой функцией ЦВС [6]:

$$W = \text{sinc}\left(\pi \frac{F_c}{F_T}\right). \quad (2)$$



Рис. 1

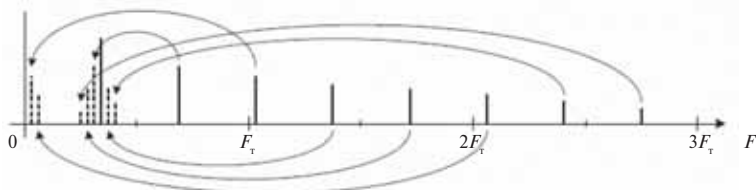


Рис. 2

Для их подавления на выходе ЦВС, как правило, применяется фильтр нижних частот (ФНЧ) с полосой (0,3...0,4) F_T , ограничивающей рабочую полосу ЦВС (рис. 1, а). Однако из-за неидеальности ФНЧ не полностью подавляются комбинационные составляющие сигнала, лежащие вне полосы пропускания ФНЧ в окрестностях тактовой частоты и частот, кратных тактовой (см. формулу (1) и рис. 1, б).

Как будет показано ниже, эти неподдавленные копии сигнала могут перенестись в полосу пропускания ФНЧ из-за нелинейности цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Любой ЦАП имеет интегральную и дифференциальную нелинейности [10], а также так называемые «глиitchи» – выбросы напряжения при изменении цифрового кода на его входе.

Кроме того, разрядность быстродействующих ЦАП ограничивается некоторыми технологическими причинами. Влияние нелинейностей ЦАП и ограничения разрядности приводит к отличию выходного колебания ФНЧ от синусоидального и, следовательно, к появлению гармоник синтезируемого колебания. Из-за того, что высшие гармоники синтезируемого колебания взаимодействуют с гармониками тактовой частоты, формируются спектральные составляющие, частоты которых попадают в полосу пропускания ФНЧ, включенного на выходе ЦВС. Частоты этих паразитных спектральных составляющих можно вычислить по формуле:

$$F_{\text{псс}} = \pm nF_c \pm mF_T, \quad (3)$$

где n и m – положительные целые числа. Механизмы формирования комбинационных составляющих спектра выходного колебания, попадающих в полосу ФНЧ, иллюстрируются на рис. 2.

Аккумуляторы фазы в современных ЦВС обычно имеют разрядность не менее 32. Для 32-разрядного аккумулятора фазы размер таблицы синусов составит более 4 млрд значений. Если каждое значение имеет размерность 8 разрядов, то суммарный объем памяти значений синуса составит 4 Гбайт

[6]. Поэтому применяется усечение разрядности фазы. Например, в микросхеме 1508ПЛ8Т для адресации к таблице значений синуса используются только 15 старших разрядов 48-разрядного аккумулятора фазы. Остальные 33 разряда отсекаются. Возникающая за счет этого отсечения погрешность приводит к появлению паразитных составляющих с максимальным относительным уровнем [5]:

$$P = -6,02R \text{ дБ}, \quad (4)$$

где R – разрядность аккумулятора фазы после усечения.

Следует отметить, что в общей картине ПСС для современных микросхем вклад данной составляющей невелик (уровень ПСС ниже минус 90 дБ), и в дальнейших расчетах вклад ПСС такого происхождения не учитывается.

Как было отмечено выше, большинство современных ЦВС строится по параллельной схеме, позволяющей обеспечить максимальные выходные частоты и минимальное потребление мощности при выбранной технологии производства интегральных схем. Так, например, максимальная частота цифровых блоков микросхем, выполненных по КМОП-технологии, составляет 200–500 МГц. Поэтому при построении быстродействующих ЦВС с такими цифровыми блоками используется параллельная схема, в которой цифровые вычисления осуществляются одновременно в N каналах. При этом цифровые блоки (ядра) ЦВС работают на частотах, которые ниже тактовой частоты всего ЦВС.

Кроме того, непосредственно перед ЦАП устанавливается быстродействующий мультиплексор [9], который поочередно подключает выходы цифровых блоков к ЦАП. Из-за технологических сложностей при стыковке нескольких ядер, а также из-за связи по цепям питания в спектрах, сформированных таким способом, появляются паразитные составляющие с частотами, лежащими в окрестностях частот гармоник тактовой частоты ядер F_T/N .

С учетом всего вышесказанного для расчета частот паразитных составляющих в спектрах выходных колебаний

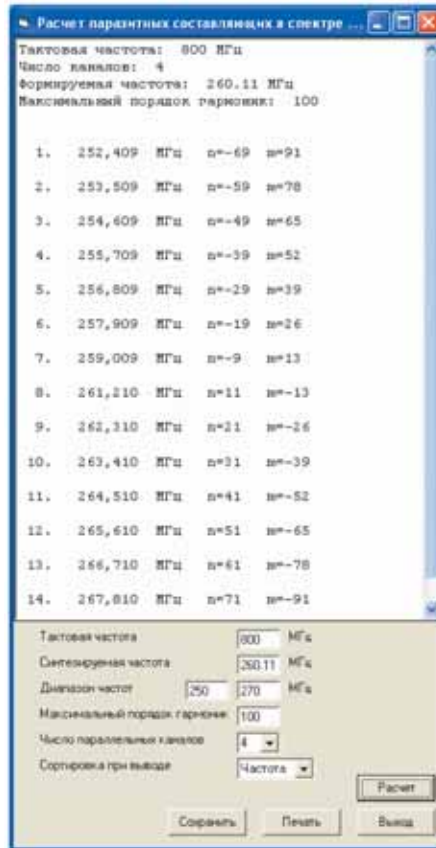


Рис. 3

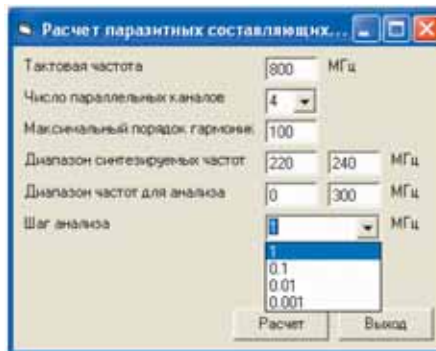


Рис. 4

современных ЦВС вместо (3) следует использовать формулу:

$$F_{\text{псс}} = \pm nF_c \pm m \frac{F_T}{N}, \quad (5)$$

где N – число параллельно работающих ядер.

Общие рекомендации по выбору полосы синтезируемых на выходе ЦВС колебаний с минимальным уровнем ПСС сводятся к следующему: синтезируемая частота не должна превышать 0,4 тактовой частоты; на выходе ЦВС обязательна установка ФНЧ; следует избегать синтеза частот, в окрестности которых попадают частоты, равные $1/2, 1/4, \dots, 1/N$ от тактовой частоты.

Программы для выбора интервалов выходных частот с минимальными уров-

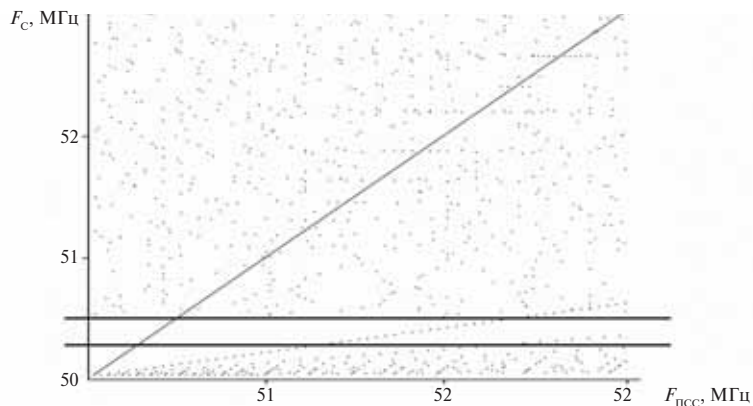


Рис. 5

ниями ПСС. Для более полной оценки частот, опасных с точки зрения возникновения ПСС, была разработана программа для ПЭВМ. Исходными данными для нее стали тактовая частота ЦВС, синтезируемая частота, интересующий диапазон частот и архитектура построения ЦВС (число ядер). Интерфейс программы приведен на рис. 3.

Результатом работы программы является список частот, опасных с точки зрения возникновения ПСС. Причем, как правило, чем выше значения коэффициентов n и m , тем ниже относительный уровень паразитной спектральной составляющей на данной частоте. В промежутках между этими частотами уровень ПСС не превышает уровень, приведенный в документации для узкой полосы частот.

Для визуализации результатов расчетов и поиска областей частот с предельно низкими уровнями ПСС разработана еще одна программа. Ее интерфейс представлен на рис. 4.

Как и в предыдущем случае, задается тактовая частота и число каналов ЦВС. Затем необходимо выбрать диапазон синтезируемых частот, область для анализа ПСС и шаг анализа. Результат работы программы графический файл, в котором по горизонтали располагается анализируемый диапазон частот, а по вертикали – диапазон синтезируемых частот. Пример визуализации картины распределения ПСС в спектре выходных колебаний ЦВС приведен на рис. 5.

Каждый пиксел графического файла отображает относительный уровень ПСС в анализируемой частотной точке при формировании ЦВС колебания с данной частотой. Чем темнее цвет пикселя, тем меньше коэффициенты m и n , а следовательно, выше относительный уровень ПСС. Размеры графического файла определяются диапазоном синтезируемых и анализируемых частот, а также шагом анализа.

В примере, показанном на рис. 5, приведена картина распределения ПСС в спектре четырехканального ЦВС с тактовой частотой 800 МГц для диапазона синтезируемых и анализируемых частот 50...53 МГц с шагом 0,01 МГц.

Для использования результатов работы программы необходимо провести на плоскости рисунка горизонтальную линию, соответствующую синтезируемой частоте. Двигаясь слева направо вдоль этой горизонтальной линии можно составить список ПСС, лежащих в заданном для анализа частотном диапазоне и оценить их ожидаемые уровни. При синтезе нескольких частот проводятся две горизонтальные линии, которые соответствуют минимальной и максимальной синтезируемым частотам. Чем меньше темных пикселей попадает в выделенную область, тем выше качество синтезируемого сигнала с точки зрения возникновения ПСС. Из приведенного примера видно, что минимальный уровень ПСС обеспечивается при синтезе частот в диапазоне 50,3...50,5 МГц.

Заключение. Приведенные программы позволяют упростить расчет частотного плана радиотехнических систем, в которых используются ЦВС, а также провести поиск областей частот с минимальными уровнями паразитных составляющих в спектре выходного сигнала ЦВС.

Авторы выражают огромную признательность профессору кафедры Формирования колебаний и сигналов НИУ МЭИ В.Н. Кулешову за советы и помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tierney J., Rader C.M., Cold B. A Digital Frequency Synthesizer // IEEE Trans. Audioelectroacoust. – March 1971. – Vol. Au-19. – P. 48.
2. AD9914 Datasheet. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9914.pdf
3. Техническое описание микросхемы 1508ПЛ8Т. <http://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/products/eb1508pl8t/1508pl8d.pdf>
4. Гусев В.В., Скок Д.В., Кочемасов В.Н. и др. Отечественная микросхема ЦВС радиосигналов с выходными частотами до 400 МГц / Сб. докл. Всероссийского науч.-техн. семинара «Синхроинфо-2010». – Н. Новгород, 2010 – С. 107–110.
5. AD9858 Datasheet. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9858.pdf
6. Ридико Л.И. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. – 2001. – № 7.
7. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf
8. Kroupa V.F. Spectral Properties of DDFS: Computer Simulations and Experimental Verifications / Proc. IEEE International Frequency Control Symposium. – 1994. – P. 613–623.
9. Жаров А.Н., Кочемасов В.Н., Будисхов В.П. Синтезатор сигналов с заданным законом изменения фазы / Авт. свид-во СССР SU 1686693 A1, 23.10.91.
10. Kester W. The Data Conversion Handbook. – Newnes, 2005.

Получено 09.01.13

Поправка: на с. 29 (ЭС, 2013, № 3) в статье «Анализ эффективности методов и алгоритмов видеокompрессии стандарта H.265/HEVC» неверно указана должность одного из авторов. Следует читать: М.П. Шарабайко, аспирант кафедры Вычислительной техники Томского политехнического университета.