

ПРЯМАЯ ЦИФРОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ: ПРИНЦИПЫ И РЕШЕНИЯ

А.Ткаченко al.tkachenko@bk.ru

Цифровые методы обработки все активнее используются в узлах, которые прежде можно было реализовать лишь аналоговым способом. Например, модуляторы в современных трансиверах. АЦП уже работают на столь высоких частотах, а усилители входного тракта обладают столь широкой полосой, что позволяют оцифровывать широкополосный радиосигнал непосредственно на несущей частоте. Если раньше сигналы формировались в цифровом виде на промежуточной частоте, то последнее время возрос интерес к идее прямой (непосредственной) цифровой модуляции (Direct Digital Modulation, также встречаются Digital-To-RF, Fully Digital (Transmitters) и др.). Какие успехи достигнуты в этой области?

ИДЕЯ ОДНА – РЕАЛИЗАЦИИ РАЗНЫЕ

В зарубежных публикациях термин *Direct Digital Modulation* (DDM) начал применяться с середины 2000-х годов, хотя публикации на эту тему были и раньше. В отечественной научной традиции прямого аналога DDM еще не сформировалось.

Стоит отметить, что под DDM понимают не конкретную технологию, а принцип формирования модулированного сигнала. В DDM передаваемая цифровая информация непосредственно используется при модуляции сигнала на несущей частоте. Достигается это может воздействием потока цифровых данных на устройство формирования несущей радиочастоты, или же модулированный сигнал генерируется на несущей частоте полностью в цифровом виде и потом преобразуется с помощью быстродействующего ЦАП. В результате становятся

ненужными многие аналоговые компоненты передающего тракта (смеситель, тракт промежуточной частоты (ПЧ), модулятор и в некоторых случаях выходной усилитель мощности). Передающий тракт становится более стабильным, компактным, экономичным и дешевым. Возможности формировать любые виды модуляции становятся практически безграничными, их сдерживает только вычислительная мощность цифровой части. Улучшается линейность, достигается практически идеальная симметрия квадратур, а в выходном спектре нет паразитных сигналов гетеродина(ов).

В современных радиотехнических системах радиосигнал формируют переносом сигнала с промежуточной частоты на несущую. Обычно для этого перемножают (смешивают) немодулированный ВЧ-сигнал гетеродина и модулированный сигнал

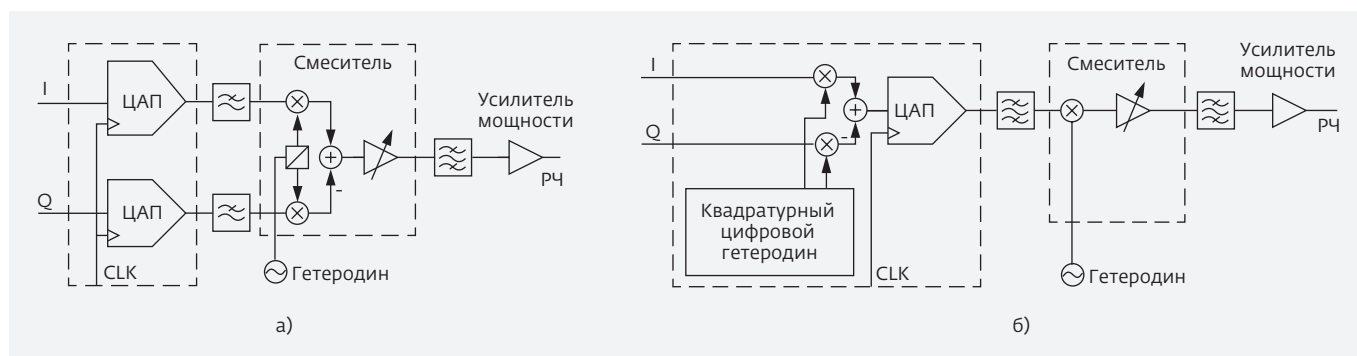


Рис.1. Традиционные аналоговые схемы формирования радиочастотного сигнала: а) с помощью квадратурного смесителя, б) посредством обычного аналогового смесителя

на ПЧ, для чего используются различные схемы преобразования (рис.1). Сигнал ПЧ получают чаще всего из цифрового сигнала на "нулевой" или промежуточной частоте с помощью ЦАП, в качестве гетеродина применяют различные синтезаторы частот с ФАПЧ. Вместо обычного аналогового смесителя может быть использован квадратурный смеситель, дающий дополнительное подавление зеркальной частоты в случае формирования сигнала ПЧ в квадратурах (рис.1а).

Логичным развитием таких схем и стали методы непосредственной цифровой модуляции на основе:

- воздействия полезного цифрового сигнала на схему ФАПЧ синтезаторов частот;
- использования высокочастотного ЦАП для формирования сигнала сразу на несущей частоте;
- непосредственного наложения цифрового потока данных на ВЧ-сигнал (можно назвать такие схемы "цифроаналоговым смесителем", на сигнальный вход которого подается цифровой поток данных, а на гетеродинный вход – аналоговый сигнал несущей частоты).

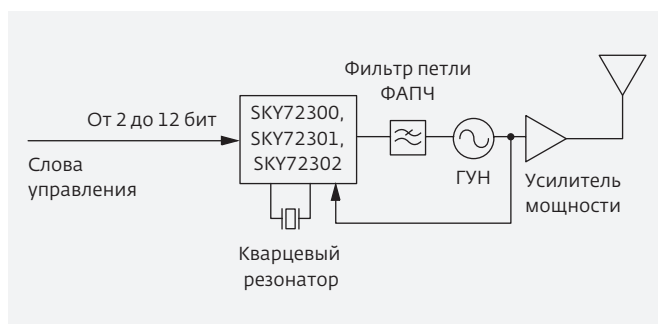


Рис.2. Тракт с DDM на основе ФАПЧ-синтезаторов серии SKY7230x

Рассмотрим их подробнее на примере серийно выпускаемой продукции ведущих мировых производителей.

DDM С ПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ФАПЧ

Пример реализации DDM посредством прямого воздействия цифрового потока на синтезаторы с ФАПЧ – решения компании **Skyworks Solutions** (www.skyworksinc.com) [1]. Компания производит синтезаторы с ФАПЧ с дробным делителем SKY72300, SKY72301, SKY72302. Используя их, можно предельно упростить структуру передатчика. В передающем тракте остается только сам синтезатор, внешний генератор, управляемый напряжением (ГУН), и задающий кварцевый резонатор (рис.2). Схемы ФАПЧ, содержащие синтезатор серии SKY7230x и ГУН, позволяют сразу формировать модулированную несущую частоту. Данная схема работает как цифро-частотный преобразователь.

Микросхема SKY72300 содержит два синтезатора частоты (основной и вспомогательный) с дробным коэффициентом деления на основе $\Sigma\Delta$ -модулятора (рис.3). Выходной сигнал можно модулировать по частоте, изменяя содержимое управляющих регистров внутри синтезатора. Это позволяет быстро перестраивать частоту внешнего ГУН, формирующего выходную радиочастоту (см. рис.2). Такой подход позволяет легко получать сигнал с частотной модуляцией (ЧМ, FM), частотной манипуляцией (FSK), частотной манипуляцией с минимальным сдвигом (MSK), гауссовской частотной манипуляцией с минимальным сдвигом (GMSK) и другими видами модуляции с непрерывной фазой и постоянной амплитудой.

Рассмотрим реализацию DDM подробнее. Модулированный сигнал формируется путем многочисленных быстрых частотных перестроек. Входные цифровые данные из последовательного

канала поступают в регистр данных модуляции, а оттуда – в блок модуляции. Содержимое блока модуляции определяет смещение по частоте (вверх или вниз) относительно центральной частоты, на которой работает синтезатор. Поддерживается как стандартный (16-разрядные данные) режим загрузки регистра данных модуляции, так и режим прямой загрузки (не требующей задания адреса). Длина управляющего слова в данном режиме может варьироваться в пределах от 2 до 12 бит. Режим прямой загрузки существенно увеличивает скорость модуляции.

В регистр данных модуляции необходимо записывать значение частотного сдвига. Следовательно, входной информационный поток необходимо превратить в значения частоты (или смещения частоты). Для этого во внешнем управляющем контроллере обычно используют заранее подготовленную таблицу преобразования (Look-Up Table, LUT). Информационные данные будут для нее входными значениями, а выходными – значения частоты. При этом требуются минимальные вычислительные мощности.

Фазовая манипуляция (PSK), например квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), не обеспечивает непрерывность фазы сигнала. Для реализации PSK с помощью синтезаторов серии SKY7230x необходимо скачки фазы аппроксимировать скачками частоты [1]. Это требует нескольких частотных скачков на один информационный бит. К тому же такая аппроксимация допустима, если время перестройки частоты, имитирующей скачок фазы, значительно меньше длительности информационной посылки. Следовательно, подобный метод применим только при низкой скорости передачи данных, поэтому для фазовых методов модуляции синтезаторы серии SKY7230x не очень удобны.

Рассмотрим параметры модуляции, реализуемые синтезаторами серии SKY7230x. Одна из основных характеристик – скорость передачи данных – зависит в данной схеме от трех параметров: внутренней опорной частоты синтезатора, полосы пропускания петли ФАПЧ и пропускной способности его последовательного интерфейса управления.

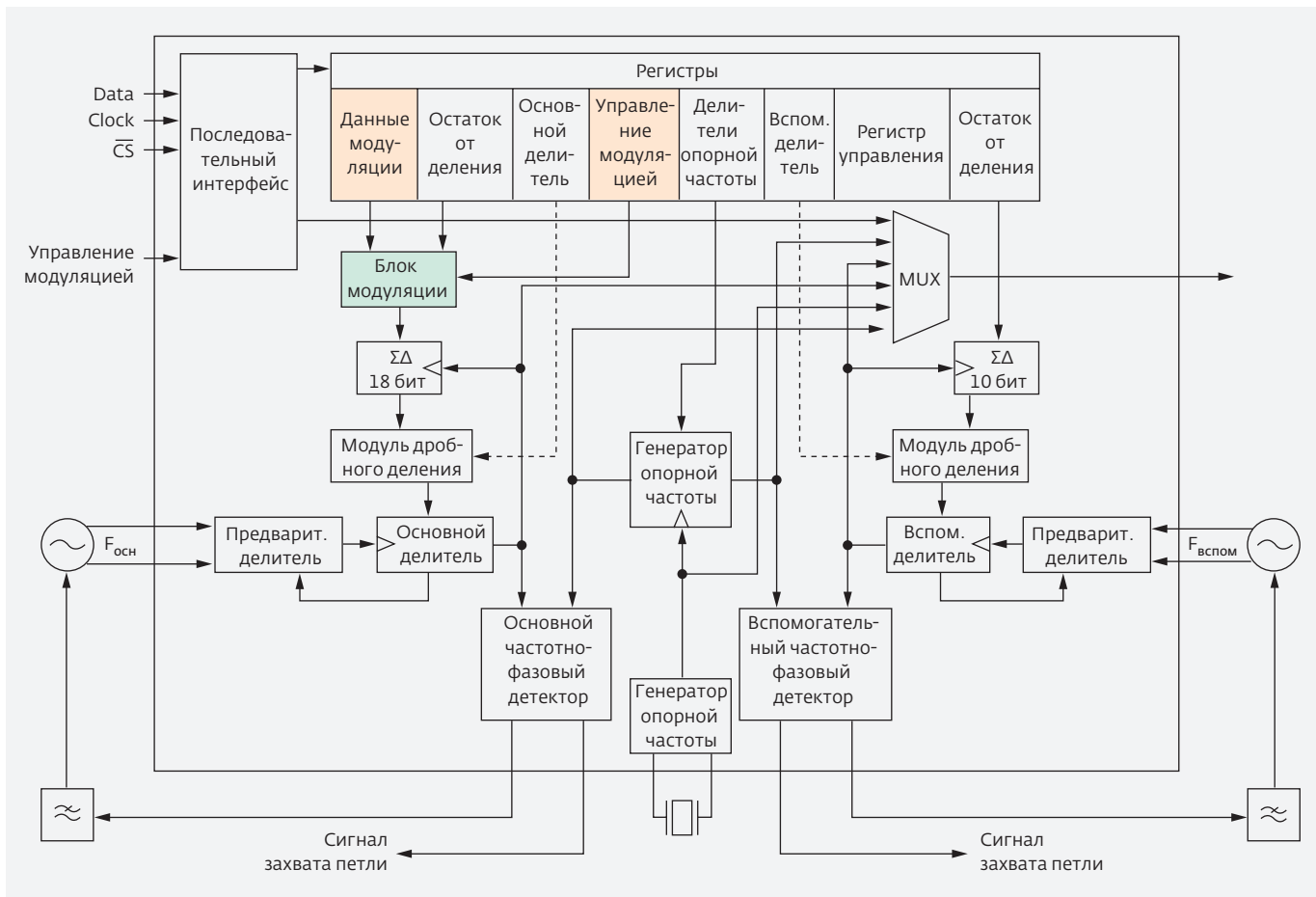


Рис.3. Структура синтезатора SKY72300

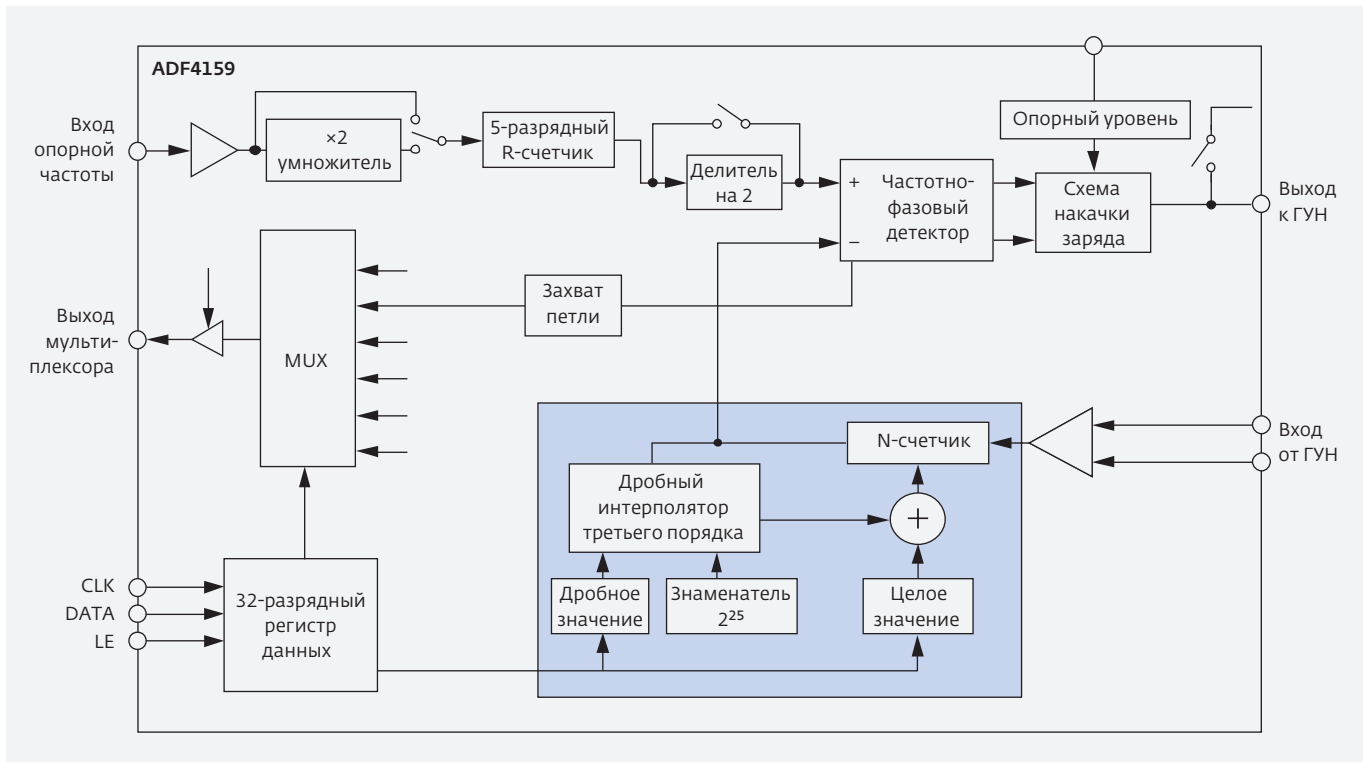


Рис.4. Структура синтезатор ADF4159

Внутренняя опорная частота синтезатора определяет максимальную частоту работы фазового детектора и не может быть больше 25 МГц. Дробное деление частоты реализовано посредством $\Sigma\Delta$ -модулятора. Но сам принцип его работы основан на усреднении достаточно большого числа отсчетов (порядка 100). В этом случае максимальная частота формирования модуляционных символов (частота модуляции) составит 25/100 МГц. Максимальная скорость передачи данных равна произведению удельной скорости передачи конкретной модуляции (теоретическое значение, определяемое теоремой Шеннона) на частоту модуляции. Например, удельная скорость передачи с частотной манипуляцией (FSK) равна 0,5 бит/с/Гц (при индексе модуляции больше единицы). Тогда при внутренней опорной частоте 25 МГц получим скорость передачи данных $0,5 \text{ бит/с/Гц} \times 25 \text{ МГц} / 100 = 125 \text{ Кбит/с}$.

Полоса петли ФАПЧ должна быть не меньше полосы информационного потока. Очевидно, что теоретическая максимальная скорость передачи данных равна произведению удельной скорости передачи модуляции на полосу пропускания фильтра в петле ФАПЧ. Поскольку полосу пропускания фильтра в петле ФАПЧ можно задать на уровне нескольких мегагерц, сопряженное с ней ограничение не будет определяющим.

Видно, что ограничение, связанное с пропускной способностью последовательного интерфейса (до 50 Мбит/с), на фоне предыдущих уже не играет роли.

Следовательно, даже при использовании модуляций с более высокой спектральной эффективностью, максимальная скорость передачи данных в системе с синтезатором с ФАПЧ серии SKY7230х не может превышать нескольких сотен Кбит/с.

Синтезаторы ФАПЧ с дробным делителем, имеющие возможность формировать модулированный сигнал, производит и компания **Analog Devices** (www.analog.com). Возможности этого класса микросхем рассмотрим на примере самого совершенного на сегодняшний день синтезатора ADF4159 с полосой 13 ГГц [3] (рис.4). Максимальная частота работы фазово-частотного детектора в синтезаторе составляет 110 МГц. Выходной сигнал синтезатора формирует прецизионная схема накачки заряда.

Схема ФАПЧ на основе ADF4159 может применяться для формирования радиосигнала с частотной (FSK) и фазовой манипуляцией (PSK). Также возможно формирование сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) различных форм, например, с треугольной или пилообразной частотной зависимостью (рис.5). При необходимости каждый цикл качания частоты может запускаться внешним импульсом. Режимы качания частоты

не ограничиваются приведенными примерами. С помощью микросхемы ADF4159 легко реализуются режимы сканирования частоты с двумя чередующимися скоростями перестройки (рис.6а), между сканированиями можно добавлять паузы (рис.6б). Аппаратно поддерживается целый ряд других режимов [3], в том числе и режим нелинейного сканирования, задающийся рекуррентной формулой $f_{\text{вых}}(n+1) = f_{\text{вых}}(n) + n \Delta f$ (рис.6в).

Режим частотной манипуляции (FSK) задается центральной частотой и девиацией относительно нее. Направление частотного смещения (вверх или вниз) можно задать внешним сигналом на выделенном выводе ИС. Это существенно повышает скорость управления модуляцией

В отличие от рассмотренных синтезаторов компании Skyworks Solutions, в микросхеме ADF4159 аппаратно поддерживается фазовая манипуляция. Значение фазы сигнала задается 12-разрядным числом в диапазоне от 0 до 360°, внешний логический сигнал на входе TX_{DATA} – знак фазы. Например, число 1024 соответствует фазе 90°, если на входе TX_{DATA} высокий логический уровень, и –90°, если на TX_{DATA} низкий логический уровень. Непосредственно подавая на вход TX_{DATA} поток данных, можно формировать бинарный фазоманипулированный (BPSK) ВЧ-сигнал. Для многопозиционной фазовой манипуляции необходимо в каждом такте перезаписывать регистр управления фазой.

Производитель позиционирует микросхему как элегантное решение для построения радаров с частотно-модулированным непрерывным излучением (FMCW). Действительно, имея такое многообразие режимов

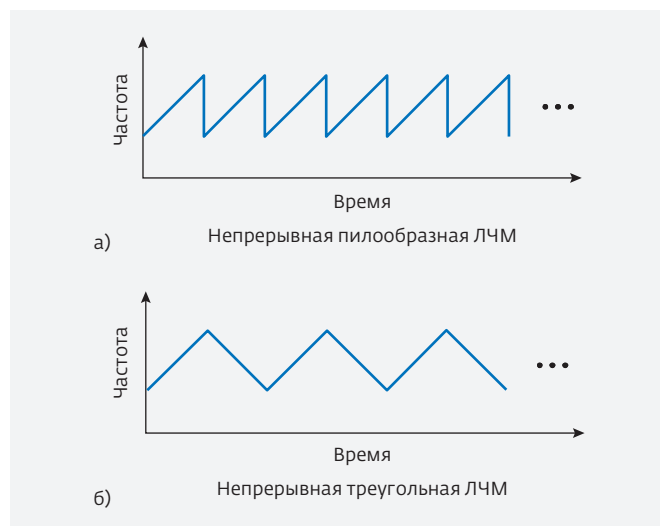


Рис.5. Сигналы с ЛЧМ а) пилообразной, б) треугольной

качания частоты с аппаратной поддержкой, ADF4159 позволяет строить эффективные по затратам, энергопотреблению и габаритам формирователи излучаемого и гетеродинного сигналов для таких радаров. Однако этот синтезатор прекрасно подходит и для построения простых передатчиков, реализующих идею DDM, с разными видами фазовых модуляций при постоянной амплитуде выходного сигнала (рис.7). Скорость передачи данных в основном зависит от скорости захвата петли при изменении параметров управления и может достигать порядка 1 Мбит/с или чуть больше при использовании многопозиционных схем модуляции.

Группа исследователей из Университета Мичигана (США) предложила еще один способ реализации DDM на основе синтезатора с дробным коэффициентом деления [4] для формирования фазовых модуляций (рис.8). Особенностью предложенного метода является добавление цифровой информации о модуляции к выходу фазового детектора, в отличие от более распространенных

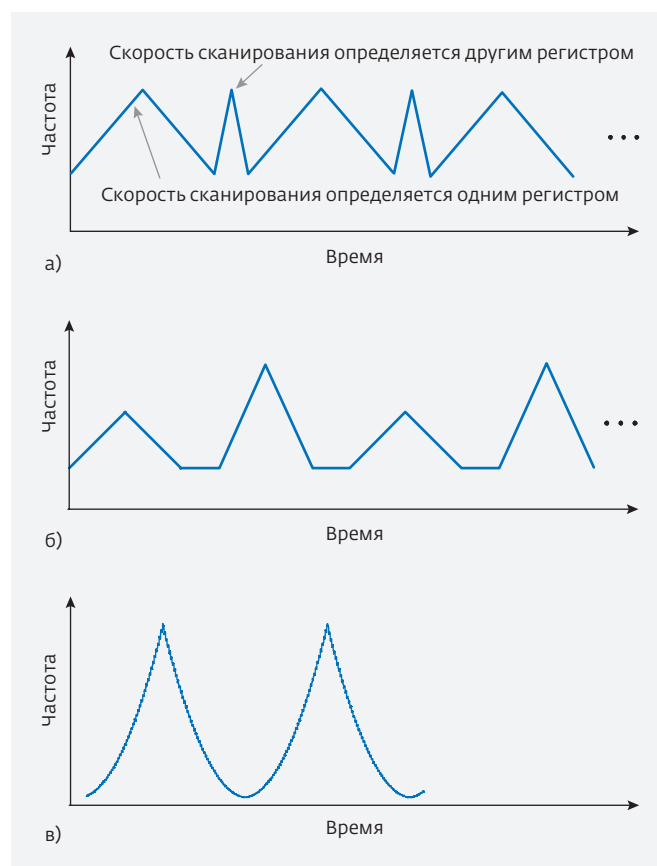


Рис.6. Режимы ЛЧМ синтезатора ADF4159: а) с двумя чередующимися скоростями перестройки; б) с паузами между сканированиями; в) нелинейное сканирование.

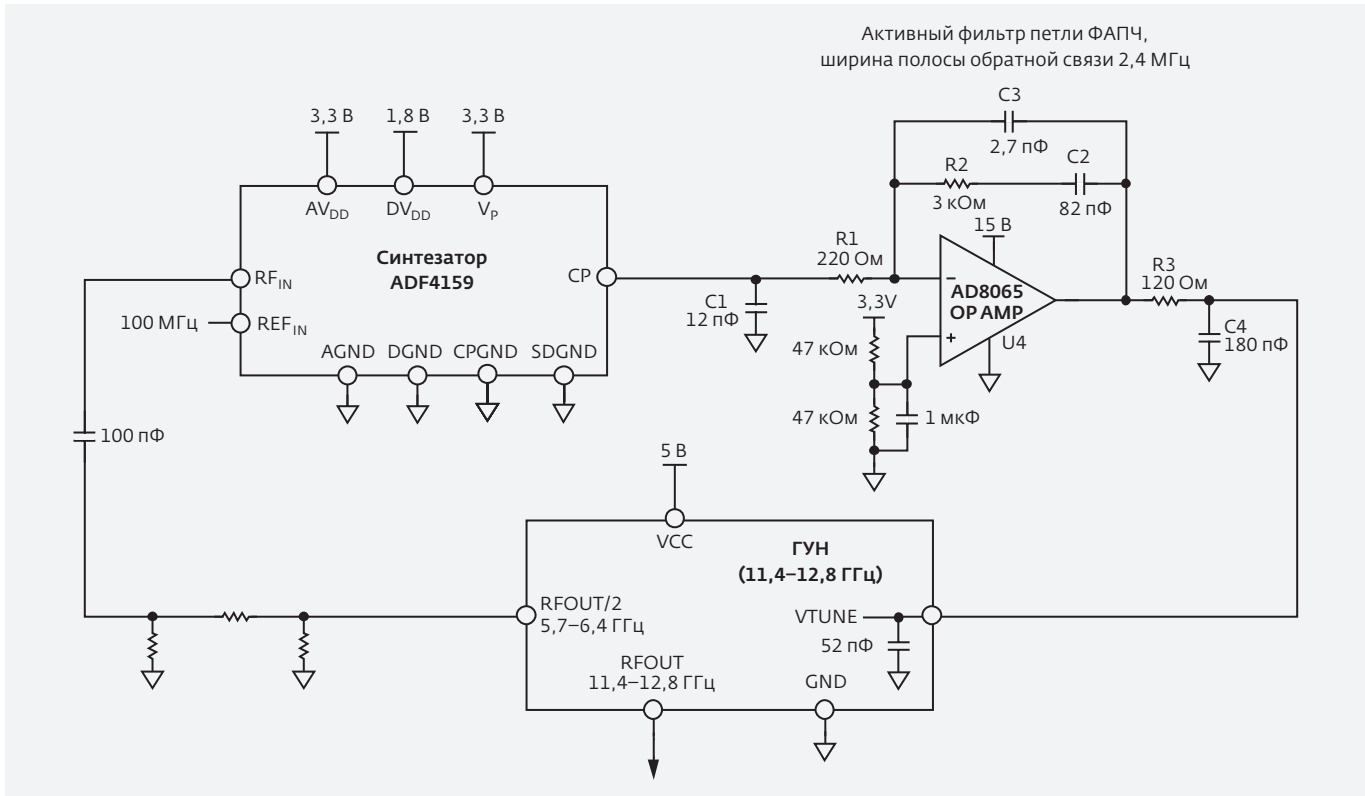


Рис.7. Пример построения системы ФАПЧ на основе синтезатора ADF4159

подходов влияния на коэффициент деления. Авторы называют свой способ более "прямым".

Предложенная схема содержит два $\Sigma\Delta$ -модулятора: один для формирования дробного коэффициента деления, второй – для понижения разрядности ЦАП. Квантователь фазы сравнивает сигнал с делителя с опорным тактовым сигналом. Далее цифровой интегратор усредняет сигнал ошибки. К выходу интегратора добавляются модуляционные данные (входная информация). $\Sigma\Delta$ -модулятор вместе с ЦАП преобразует полученный цифровой поток в аналоговый сигнал для управления ГУН.

Последовательность входных данных проходит через предвысказывающий фильтр для компенсации частотных характеристик петли ФАПЧ. Это позволяет использовать более высокие скорости переключения фазы. Такое решение стало возможным благодаря полностью цифровой реализации фазового детектора.

Изложенная идея была воплощена в опытной ИС, включавшей все элементы петли ФАПЧ, в том числе ГУН с выходным буфером [4], рассчитанной на работу на частоте 2,66 ГГц. Выполнена она по 0,13-мкм КМОП-технологии и потребляет 30 мА при напряжении питания 1,5 В. Тестирование

показало устойчивую работу при квадратурной фазовой модуляции со сдвигом (OQPSK) со скоростью передачи 300 Кбит/с и при гауссовской частотной манипуляции с минимальным сдвигом (GMSK) со скоростью 100 Кбит/с [4].

Подведем итоги. На основе ФАПЧ с дробным коэффициентом деления возможна реализация DDM. Достоинства данного варианта:

- высокие рабочие частоты (более 10 ГГц),

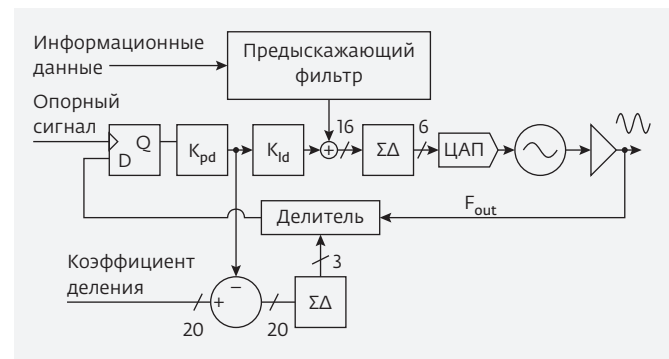


Рис.8. Архитектура петли ФАПЧ с добавлением данных к выходу фазового детектора. K_{pd} и K_{fd} – коэффициенты передачи фазового детектора и всей петли ФАПЧ соответственно

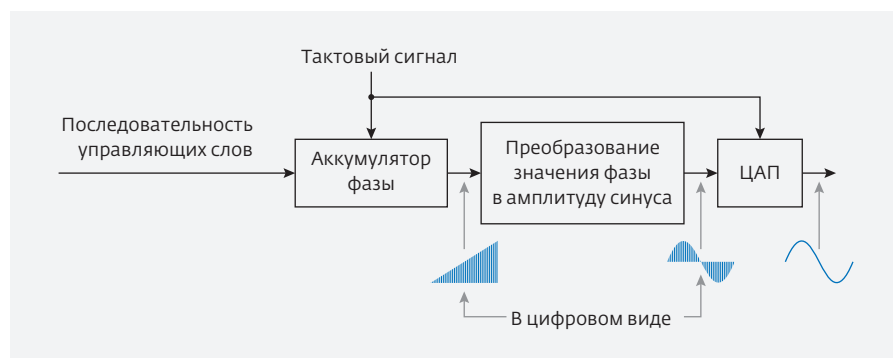


Рис.9. Принцип формирования сигналов посредством прямого цифрового синтеза

- простота реализации,
 - экономичность в потреблении энергии (20–100 мВт),
 - минимум необходимых элементов.
- К недостаткам можно отнести:
- невысокую скорость передачи данных – на уровне сотен Кбит/с (единиц Мбит/с для некоторых видов модуляций);
 - ограниченный набор реализуемых модуляций: только постоянная амплитуда и непрерывная фаза (фазовые переходы "сглажены"), формирование сигналов только с одной несущей.

Синтезаторы с ФАПЧ целесообразно применять для реализации DDM в устройствах, где требуется в первую очередь компактность схемы и малое потребление при невысокой скорости передачи. Это могут быть беспроводные датчики, носимые устройства управления и контроля, каналы передачи телеметрической информации и команд управления малогабаритных летательных аппаратов и транспортных средств.

DDM НА СБИС ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА

Формировать радиочастотный сигнал с непосредственной модуляцией позволяют микросхемы прямого цифрового синтеза (DDS). Они представляют собой объединение вычислительного ядра и ЦАП, интегрированных на одном кристалле. Цифровое ядро рассчитывает мгновенные значения фазы сигнала, которые с помощью таблицы синуса пересчитываются в отсчеты сигнала. Полученная последовательность отсчетов поступает на ЦАП (рис.9).

Через канал управления можно влиять на параметры формируемого сигнала – менять его частоту, фазу, а в некоторых устройствах DDS – и амплитуду. Есть микросхемы с поддержкой дополнительных видов модуляции, таких как частотная и фазовая манипуляция, ЛЧМ и др. Встроенная поддержка сложных схем модуляции позволяет

упростить решение и, как правило, достигать большей скорости изменения модулируемых параметров сигнала (фазы, частоты, амплитуды).

Несомненным мировым лидером в разработке и производстве микросхем прямого цифрового синтеза является Analog Devices. Большинство микросхем DDS имеют тактовые частоты до 1 ГГц, позволяют формировать аналоговый сигнал с полосой до десятков или сотен мегагерц и поэтому больше подходят для формиро-

вания тактовых последовательностей и сигналов промежуточной частоты (имея в некоторых моделях разрешение по частоте менее тысячной доли Гц). Лучшее для реализации DDM подходит самая скоростная (на февраль 2014 года) СБИС DDS AD9914 с тактовой частотой до 3,5 ГГц, позволяющая непосредственно формировать аналоговый сигнал частотой до 1,4 ГГц (рис.10) [5]. Рассмотрим основные параметры этого синтезатора применительно к задачам DDM.

СБИС AD9914 оснащена высокоскоростным 12-разрядным ЦАП (3,5 Гвыборков/с). Синтезатор AD9914 способен формировать сигнал с шагом установки частоты до 190 пГц (в специальном режиме), имеет 16-разрядный регистр управления фазой и 12-разрядный регистр амплитуды. Допустима быстрая перестройка частоты, фазы и амплитуды. Пользователь может управлять режимами линейного качания как частоты, так и фазы и амплитуды. Параметры управления могут быть загружены в AD9914 через последовательный или 32-разрядный параллельный порты. Возможно непосредственное формирование сигналов с амплитудно-фазовой полярной модуляцией. Полярная модуляция – аналог квадратурной модуляции, но для описания сигналов используются не декартовы координаты (I- и Q-составляющие), а полярные, т.е. амплитуда (радиус-вектор) и фаза. Для получения сигналов с полярной модуляцией можно использовать высокоскоростной параллельный входной порт, обеспечивающий высокую пропускную способность данных управления фазой, частотой или амплитудой.

У микросхемы AD9914 есть еще одна особенность, которая может оказаться востребованной для реализации DDM, – наличие восьми профилей (наборов регистров), задающих частоту, фазу и амплитуду формируемого сигнала. Включить тот или

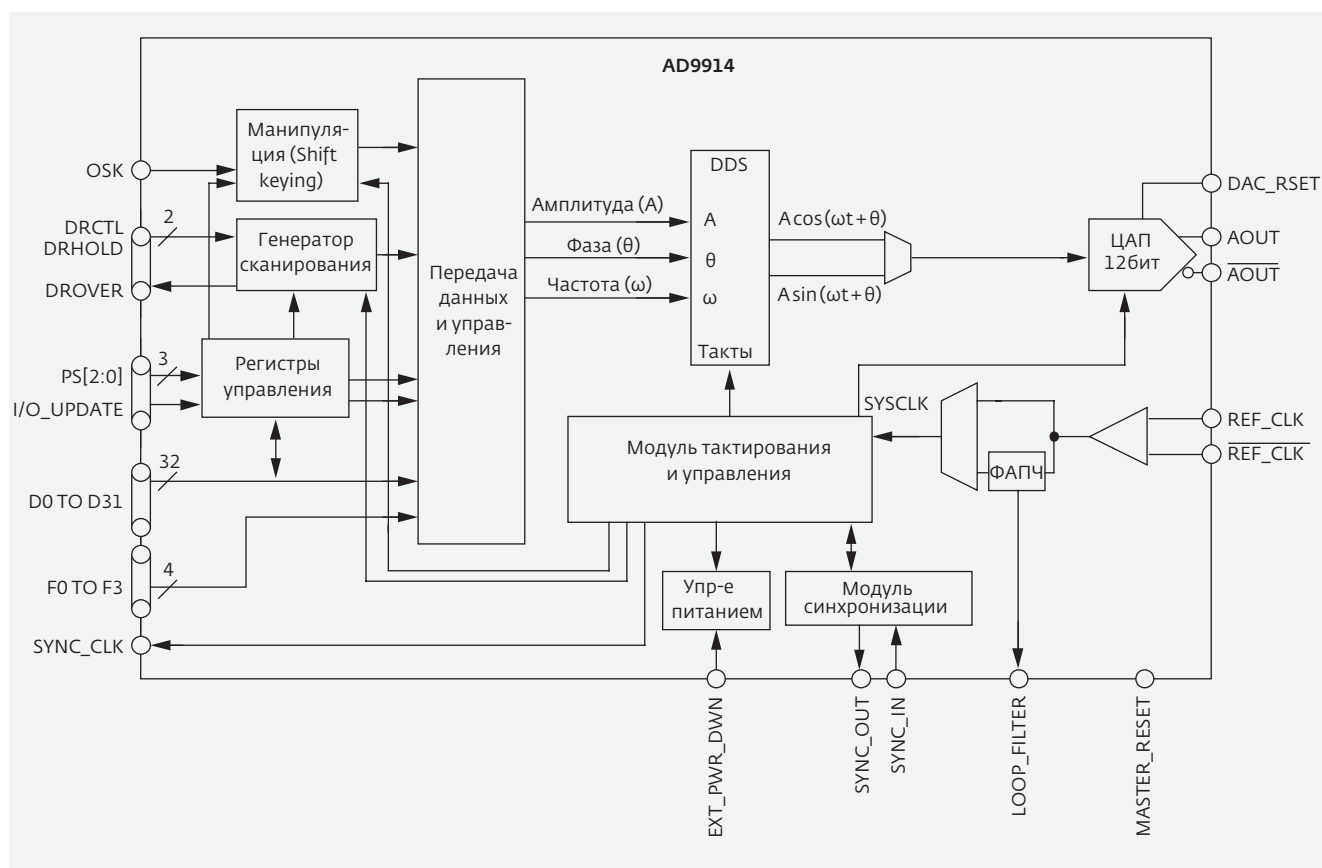


Рис.10. Структурная схема синтезатора AD9914

иной активный профиль можно, просто задав на трех входах СБИС (PS0–PS2) его номер (число от 0 до 7). В регистры профилей заранее записывают необходимые параметры сигнала (частота, фаза, амплитуда), соответствующие восьми модуляционным символам согласно выбранной схеме модуляции. Последовательность данных после простейшего преобразования (например, группировки по три бита и распараллеливания их на три входа PS0–PS2) представляет собой последовательность номеров профилей, которые поступают на входы PS0–PS2 выбора активного профиля. Частота переключения состояний в этом режиме – до 73 МГц, что обеспечивает скорость передачи данных до 219 Мбит/с.

Таким образом, реализация DDM с помощью микросхем прямого цифрового синтеза обладает следующими достоинствами:

- простота – систему можно реализовать на одной микросхеме;
- поддержка множества схем модуляции (за исключением модуляций с несколькими несущими);
- скорость передачи данных достигает сотен Мбит/с (при наличии дополнительных блоков,

облегчающих формирование конкретных видов модуляции).

К недостаткам можно отнести:

- синтезаторы пока относительно низкочастотны (до 1,4 ГГц);
- потребление энергии может достигать до 2–4 Вт;
- цена DDS-синтезаторов остается высокой (для AD9914 в США 159,5 долл. в партии до 499 шт.).

Учитывая недостатки, прежде всего рабочие частоты и цену, применять DDS для реализации идеи DDM целесообразно лишь в тестовых образцах, лабораторных макетах, для отработки новых идей. Они совмещают простоту схемы и управления с широкими возможностями изменения частоты и вида модуляции, обеспечивают хорошие скорости передачи данных.

DDM С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦАП

В микросхемах DDS на одном кристалле интегрирована цифровая схема формирования сигнала и ЦАП. Для формирования конкретных видов DDM такое решение может оказаться избыточным в силу большой универсальности и в итоге неоптимальным, например, по скорости модуляции или

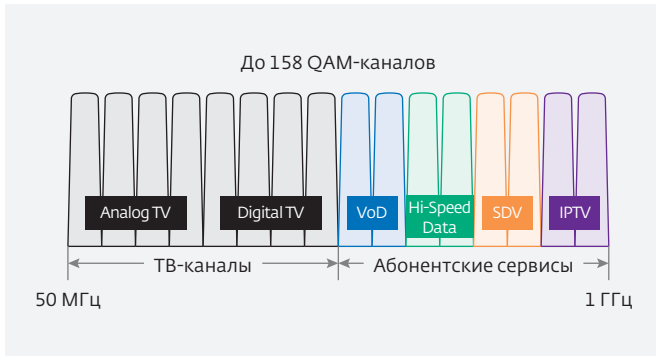


Рис.11. Спектр сигнала современной сети кабельного ТВ

энергопотреблению. Выходом может стать применение отдельного высокоскоростного ЦАП и схемы формирования цифрового модулированного сигнала. Такое схемотехническое решение полностью развязывает руки разработчику устройства: можно формировать сигналы с абсолютно любой модуляцией.

Более того, подобная схема позволяет формировать суммарный сигнал от многих источников (или каналов), даже с разными видами модуляции каждого сигнала. Это очень удобно, например, в базовых станциях сотовой связи – один передатчик позволит формировать суммарный сигнал сразу всем абонентам базовой станции. Подобная идея уже реализована в аппаратуре головных станций сетей кабельного телевидения.

Современные кабельные сети могут транслировать не только множество телевизионных каналов, но и предоставлять различные абонентские сервисы, такие как "видео по запросу" (Video-on-Demand, VoD), переключаемое цифровое видео (Switched Digital Video, SDV), высокоскоростной доступ в Интернет и др. (рис.11) [6]. Для этих сервисов предусмотрена спектральная полоса от 50 до 1000 МГц. В соответствии со стандартом передачи данных по коаксиальному кабелю DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specifications, ITU J.112/J.83), всего в этом диапазоне может быть до 158 сервисных каналов шириной по 6 МГц, в каждом канале передается сигнал с многопозиционной QAM-модуляцией (QAM – квадратурная амплитудно-фазовая модуляция). Например, для передачи данных со скоростью 42 Мбит/с используется модуляция 256-QAM.

В большинстве существующих головных станций объединяются QAM-сигналы от многочисленных супергетеродинных аналоговых передатчиков, образуя полный спектр вещания (рис.12а). Передатчик с DDM (рис.12б) формирует все QAM-несущие полностью в цифровой области. Этот метод реализован компанией Maxim Integrated (www.maximintegrated.com) в виде чипсета из двух СБИС – 128-канального цифрового повышающего преобразователя (DUC) с QAM-модулятором MAX5880 и высокоскоростного ЦАП MAX5882. Каждая из микросхем выпускается в 256-выводном CSBGA-корпусе размером 17×17 мм.

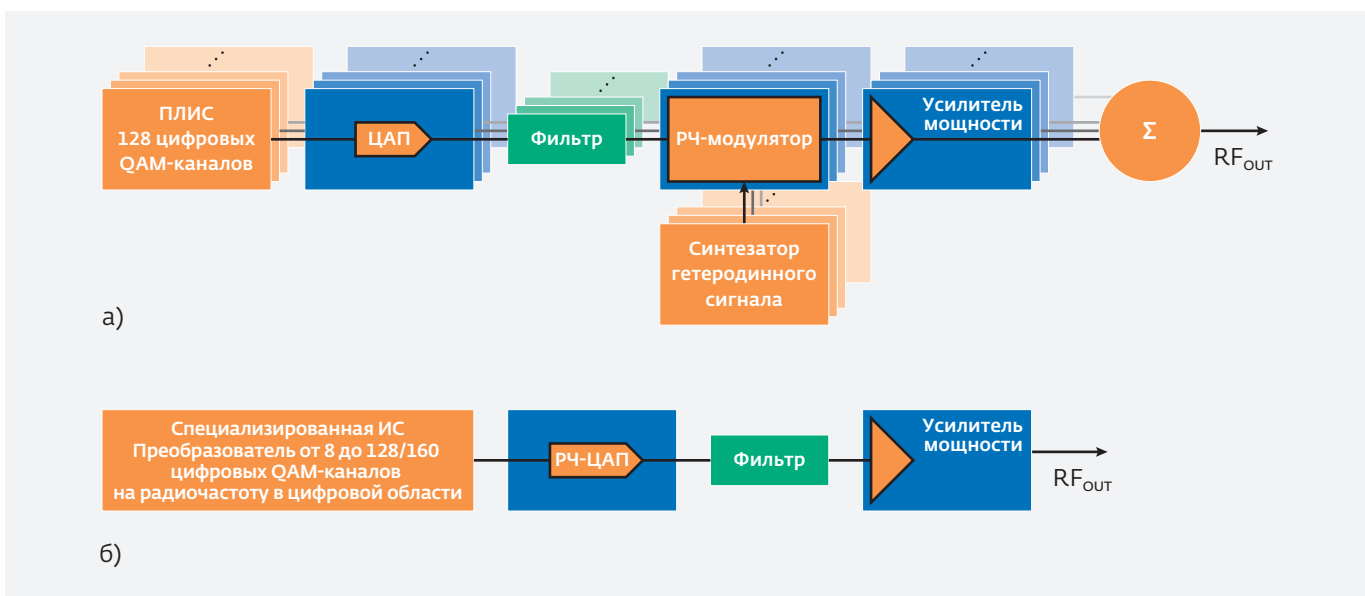


Рис.12. Классическая структура головной станции кабельного ТВ (а) и ее структура с DDM (б)

MAX5880 выпускается в версиях с 8, 16, 24, 32, 48, 64, 96 или 128 каналами [7]. MAX5880 оснащен четырьмя 10-разрядными входными портами, каждый из которых может принимать до 32 видеопотоков в режиме разделения по времени. Разрядность портов (максимальное число битов в символе) определяет допустимое число уровней модуляции – до 1024-QAM. Все каналы имеют независимое управление. MAX5880 поддерживает все скорости передачи, определенные в стандартах DOCSIS и DVB-C (стандарт цифрового кабельного ТВ-вещания). Набор фильтров-интерполяторов, комплексных QAM-модуляторов и сумматоров каналов позволяют расположить модулированный сигнал любого канала на частоте от 45 до 1003 МГц. Встроенные в MAX5880 цифровые синтезаторы имеют точность установки частоты QAM-каналов 125 Гц. Полоса канала может быть от 1 до 8 МГц. Интерполяторы и передискретизаторы обеспечивают линейность фазы сигнала и превосходную равномерность амплитуды. В микросхеме есть блок цифрового предискажения выходного потока данных для компенсации искажений в ЦАП и выходных усилителях. Интерфейс связи с ЦАП представляет собой четыре 14-разрядные LVDS-шины, работающие с тактовой частотой до 1250 МГц каждая.

Аналоговый сигнал формируется в 14-разрядном ЦАП MAX5882, максимальная частота преобразования которого 4,6 ГГц. Заметим, что, в соответствии с теоремой Котельникова, для синтеза аналогового сигнала с полосой 1 ГГц достаточно ЦАП с частотой преобразования немного больше 2 ГГц. Однако если используется ЦАП с частотой выборки до 2,5 ГГц, вторая и третья гармоники могут попасть в рабочую полосу до 1 ГГц из-за эффекта наложения участков спектра квантованного по времени сигнала. Эти помеховые сигналы могут привести к нарушению требований стандарта DOCSIS для передатчиков. При частоте выборки ЦАП выше 4 ГГц вторая и третья гармоники не попадают в полосу полезного сигнала.

Таким образом, набор из двух микросхем MAX5880 и MAX5882 позволяет в одном канале сформировать до 128 QAM-каналов с полосой 6 МГц каждый или 96 каналов с полосой по 8 МГц! Причем суммарное потребление этого чипсета составляет всего 6 Вт для 128 каналов. Это дает двадцатикратную экономию энергии на один QAM-канал по сравнению с классической структурой аналогового РЧ-модулятора.

Видно, что ключевым элементом этой схемы реализации DDM является высокочастотный ЦАП,

позволяющий формировать аналоговый сигнал сразу на несущей радиочастоте. Рассмотрим характеристики современных высокоскоростных ЦАП. Лидерами в этой области являются компании Analog Devices, Maxim Integrated и Texas Instruments (www.ti.com) (см. таблицу). Такие ЦАП работают на тактовых частотах почти до 6 ГГц, позволяют формировать сложные сигналы с полосой 1 ГГц и более. Некоторые имеют специальные режимы для формирования сигнала не только в первой зоне Найквиста (от 0 до половины тактовой частоты F_s), но и во второй (от $F_s/2$ до F_s) и даже в третьей (от F_s до $3F_s/2$). Радиочастотные ЦАП также могут содержать интерполяторы данных для уменьшения скорости передачи в случае, когда не требуется формировать сигналы с предельной для ЦАП шириной спектра. Такое решение позволяет снизить требования к выходным аналоговым фильтрам. Существуют опытные разработки и более скоростных ЦАП, например, в [8] описывается 8-разрядный ЦАП с частотой преобразования 10 ГГц.

Подчеркнем, что с использованием схемы DDM с высокочастотными ЦАП возможно формирование сигнала, в спектре которого присутствует любое число независимых, произвольно разнесенных по частоте каналов (в пределах полосы конкретного ЦАП), причем с любыми схемами модуляции.

Резюмируем достоинства реализации DDM на основе высокоскоростных ЦАП:

- отсутствуют ограничения по видам модуляций;
- исключительная широкополосность формируемого аналогового сигнала (до 2 ГГц у современных ЦАП);
- возможность одновременно формировать множество независимых каналов на своих несущих частотах;
- снижаются цена и энергопотребление в случае замены многих аналоговых супергетеродинных трактов одним широкополосным с DDM.

- Недостатки:
- сложность схемотехнической реализации;
 - необходимость высокоскоростных линий передачи сигнала, даже когда формируется узкополосный сигнал;
 - увеличение помеховых и шумовых составляющих в спектре при формировании сигналов выше 2-4 ГГц (в высших зонах Найквиста ЦАП).

Существенные преимущества этого метода реализации DDM проявляются в многоканальных системах, таких как ТВ-вещание и системы беспроводного абонентского доступа, в том числе мобильные.

Современные высокоскоростные ЦАП [8–11]

Микросхема	MAX5882	AD9129	DAC5670	DAC38J82*
Производитель	Maxim Integrated	Analog Devices	Texas Instruments	Texas Instruments
Разрядность, бит	14	14	14	16
Максимальная частота преобразований, ГГц	4,6	2,85; 5,7 (в режиме двойной интерполяции данных)	2,4	2,5
Максимальная частота формируемого аналогового сигнала, ГГц	Более 2	До 4,2	Более 1	Более 1
Полоса формируемого аналогового сигнала, ГГц	Более 2	Более 1,2	Более 1	Более 1
Интерфейс ввода данных	4×14 бит, до 1,15 ГГц	2×14 бит, до 1,425 ГГц	2×14 бит, до 1,2 ГГц	До 8 последовательных портов JESD204B, до 1,23 ГГц
Рассеиваемая мощность, Вт	2,3	1,0 (на частоте 2,85 ГГц), 1,3 (на частоте 5,7 ГГц)	2	1,1
Корпус	256-выводной CSBGA	160-выводной CSBGA	252-выводной GDJ	144-выводной FCBGA

* Имеет встроенный интерполятор до 16, встроенные цифровой гетеродин и квадратурный смеситель.

Стремительное развитие цифровой техники и импульсной элементной базы открывает широкие возможности для проектирования радиочастотных трактов с качественно новой структурой. Реализация DDM в аппаратуре кабельных сетей, базовых станциях сотовой связи, системах широкополосной передачи данных упрощает структуру передающего тракта, повышает энергоэффективность за счет замены одним трактом нескольких аналоговых. Для задач, не требующих высоких пропускных способностей, применение DDM позволяет получить крайне простые и экономичные реализации. Активно ищутся все новые возможности DDM и, несомненно, сферы ее применения будут расширяться.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. www.skyworksinc.com/uploads/documents/101349C.pdf.
2. www.skyworksinc.com/uploads/documents/200731B.pdf.
3. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADF4159.pdf.
4. **M.Ferriss, D.T.Lin, M.P.Flynn.** A Fractional-N PLL modulator with flexible direct digital phase modulation. – IEEE 2009 Custom Intergrated Circuits Conference, p.49-52. www.michigancmes.org/papers/mpflynn3.pdf.
5. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9914.pdf.
6. www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/5394.
7. www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/7736.
8. www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/7060.
9. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9119_9129.pdf.
10. www.ti.com/lit/gpn/dac5670.
11. www.ti.com/lit/gpn/dac38j82.
12. **Zhou Lei, Wu Danyu, Jiang Fan, Jin Zhi and Liu Xinyu.** A 10 Gsps 8 bit digital-to-analog converter with a built-in self-test circuit. – Journal of Semiconductors, 2013, vol. 34, issue 12:125007-5.

