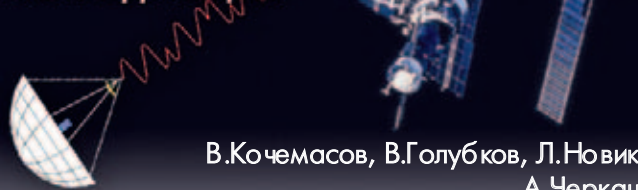


СИНТЕЗАТОР ЛЧМ-СИГНАЛОВ

С ОПЕРАТИВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯЦИИ



В.Кочемасов, В.Голубков, Л.Новиков,
А.Черкашин

Синтезаторы частот и сигналов – важнейшие составные части современных радиотехнических систем. С их помощью формируются различные сложные сигналы, в том числе с линейной и нелинейной частотной модуляцией (ЛЧМ и НЧМ). Эти сигналы применяются в радио- и гидролокации для обнаружения целей и измерения их параметров, для локационного изучения планет, ионосферного зондирования и т.п. Разнообразие систем определяет и разнообразие требований к параметрам формируемых сигналов: начальной частоте, девиации, скорости ЧМ, их длительности, периоду повторения и т.п. Во многих случаях необходимо формировать несколько сигналов или изменять параметры модуляции в течение действия сигнала. Все это и позволяют выполнять синтезаторы сигналов.

Структуры построения синтезаторов определяются требованиями к их параметрам и методами формирования ЛЧМ-сигналов. Среди возможных технических решений можно выделить следующие:

- многоуровневые цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС) [1];
- двухуровневые ЦВС с компенсацией фазовых ошибок [2];
- ЦВС с коммутацией отсчетов (ЦВС с КО) [3];
- ЦВС с однополосным переносом (ЦВС с ОП);
- синтезаторы на основе дробных ФАПЧ с компенсацией помех дробности (комбинированные вычислительные синтезаторы частоты, КВС) [4].

Эти решения были использованы в широкой номенклатуре синтезаторов, созданных на отечественной элементной базе в лаборатории "Синтезаторы сложных прецизионных сигналов" (ССПС) Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) в 80-х годах прошлого столетия (табл. 1).

Современная элементная база открывает новые возможности для построения синтезаторов сигналов. Рассмотрим один из таких синтезаторов, разработанных в МТУСИ. Он имеет следующие основные технические характеристики:

Диапазон частот	370–450 МГц
Девиация ЛЧМ-сигнала	±50 МГц
Разрешение по частоте	10 ⁻⁶ Гц
Разрешение по скорости ЧМ	~10 ⁻⁶ Гц/с
Среднеквадратическая фазовая ошибка	не более 2 град
Уровень фазовых шумов в выходном сигнале	-150 дБс/Гц при отстройке более 500 кГц от несущей частоты
Уровень паразитных составляющих в спектре выходного сигнала	менее -45 дБ

Основной режим работы синтезатора – циклическое повторение интервалов формирования ЛЧМ-сигнала (рис. 1). Диапазоны изменения временных интервалов имеют следующие значения: $t_1 = [1 \cdot 10^{-6} \dots 1]$ с; $T_{лчм1} = [50 \cdot 10^{-6} \dots 1]$ с; $t_2 = [0 \dots 1]$ с; $T_{лчм2} = [0, 5 \cdot 10^{-6} \dots 1]$ с. Во всех временных интервалах шаг установки равен $0,5 \cdot 10^{-6}$ с. Кроме циклического режима возможен режим пачки. При этом $T_n = T_c \cdot N$, где T_c – длительность цикла, $N = 1, 2, \dots 100$. Управляет синтезатором внешний компьютер по интерфейсу RS232.

Помимо формирования ЛЧМ-сигналов синтезатор вырабатывает сигналы синхронизации и дополнительные немодулированные высокочастотные колебания опорной и ряда промежуточных частот.

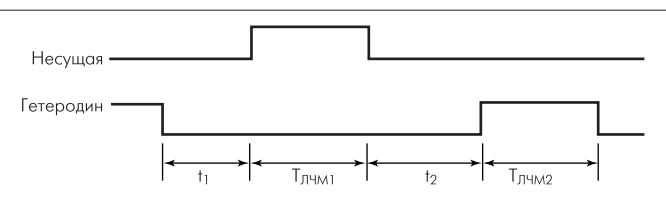


Рис. 1. Временные диаграммы работы синтезатора

Таблица 1. Характеристики синтезаторов ЧМ-сигналов, разработанных в НИЛ "ССПС" МТУСИ

Вид синтезируемого сигнала	Тип синтезатора	$F_{\text{такт}}$, МГц	Диапазон частот, МГц	Шаг установки начальной частоты $F_{\text{нач}}$, Гц	Диапазон скоростей, МГц/мкс	Шаг установки скорости ЧМ, кГц/мкс	Длительность сигнала, мкс	Уровень боковых лепестков в сжатом сигнале, дБ	СКО фазы, град.
НЧМ	Многоуровневый ЦВС	100	0–25	–	–	–	20	-40	-
ЛЧМ	Двухуровневый ЦВС	60	15–30	30	±1,7	0,87	100	-32	5,6
ЛЧМ	Многоуровневый ЦВС с ОП	40	85–115	–	–	–	500	-34	5
Полиномиальная ЧМ 3-й степени	Многоуровневый ЦВС с КО	20	13–17	10 ⁻³	±10 ⁻³	10 ⁻⁹	36·10 ⁹	–	3
ЛЧМ	КВС	5	4–160	10	±10	10	5–200	-40...-28	10
ЛЧМ	КВС	20	$F_0 \pm 60$	20	±25	10 ⁻⁴	5–1000	-34	11
ЛЧМ	КВС	20	$F_0 \pm 175$	1200	±25	12	5–1000	–	–
ЛЧМ	КВС	1,25	41–74	0,3	4·10 ⁻⁷	9·10 ⁻⁸	> 3·10 ⁷	–	0,7

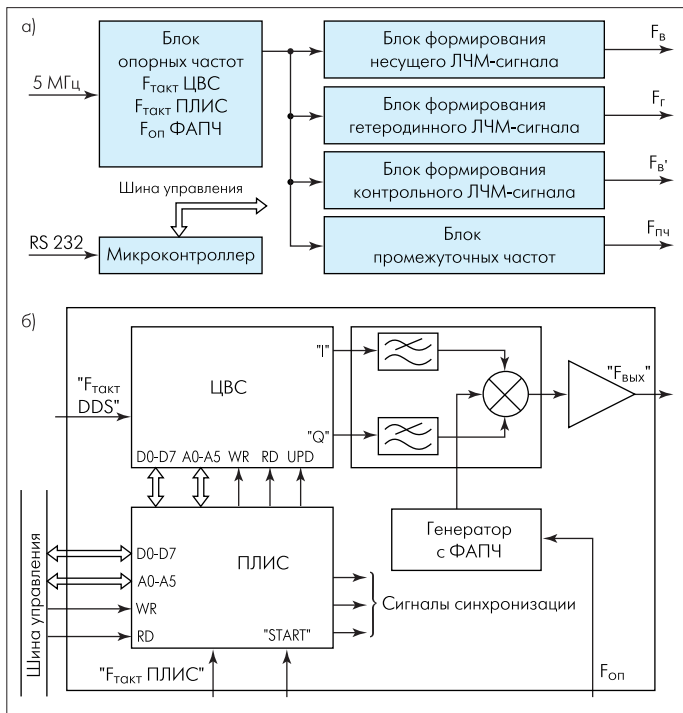


Рис.2. Структурная схема синтезатора (а) и блока формирования ЛЧМ-сигнала (б)

В состав синтезатора (рис.2а) входят однотипные блоки формирования несущего, гетеродинного и контрольного ЛЧМ-сигналов, блоки опорных и промежуточных частот, а также общий микроконтроллер.

С учетом требований к качеству ЛЧМ-сигнала и относительно небольшой девиации частоты, каждый из блоков формирования сигналов реализуется на основе ЦВС и квадратурного модулятора (рис.2б). В качестве ЦВС можно использовать одну из БИС фирмы Analog Devices – лидера на рынке подобных изделий (табл.2). Широкие возможности программного управления частотой, фазой и амплитудой выходного колебания этих микросхем позволяют применять их в блоках формирования ЛЧМ-сигнала и колебаний промежуточных частот. Сформированный квадратурный ЛЧМ-видео-сигнал переносится по частоте на величину $F_{\text{г}}$ сигнала локального синхронизированного генератора, выполненного на основе системы ФАПЧ, а затем усиливается.

Большую роль в работе блоков формирования сигналов играет устройство управления ЦВС. В разработанном синтезаторе оно реализовано на ПЛИС и выполняет следующие функции: формирование требуемых временных интервалов работы синтезатора (синхронизация); создание общего адресного пространства устройства; загрузка в регистры ЦВС в заданное время необходимых данных; формирование вспомогательных сигналов, необходимых для работы синтезатора. Применение ПЛИС позволило резко сократить число используемых микросхем в сравнении с системой на основе стандартной логики, не ухудшив при этом необходимое быстродействие управления ЦВС.

Основные выходные сигналы синтезатора вырабатывают блоки формирования несущей частоты и гетеродина. Диапазон выходных частот блока формирования гетеродинного ЛЧМ-сигнала сдвинут вниз относительно диапазона выходных частот блока формирования несущего колебания на значение промежуточной частоты.

Таблица 2. ЦВС фирмы Analog Devices с возможностью формирования ЛЧМ-сигнала

Модель ЦВС	AD9854	AD9858	AD9954	AD9956
Максимальная тактовая частота, МГц	300	1000	400	400
Разрядность накопителей частоты и фазы, бит	48	32	32	48
Негармонические составляющие, дБ	<-48	<-50	<-52	<-50
Фазовые шумы при отстройке на 1 кГц, дВс/Гц	-140	<-133	<-105	<-115
Напряжение питания, В	3,3	3,3	1,8-ядро; 1,8-3,3-ввод/вывод	
Потребляемая мощность, Вт	<4	<2,5	<0,25	<0,4
Интерфейс управления	Последовательный, параллельный		Последовательный	
Дополнительные устройства и функции	Умножитель тактовой частоты в 4-20 раз, формирование сигналов FSK, BPSK	Аналоговый смеситель с выходной частотой до 2 ГГц, кольцо ФАПЧ с внешним ГУН частотой до 400 МГц, делитель тактовой частоты на 2 с рабочей частотой до 2 ГГц	Умножитель тактовой частоты, ОЗУ объемом 1024 слова по 32 разряда; формирование сигналов FSK, BPSK	Кольцо ФАПЧ с внешним ГУН частотой до 2,7 ГГц

Блок формирования контрольного ЛЧМ-сигнала предназначен для получения вспомогательного колебания F'_B , используемого при измерении фазовых шумов и для оценки точности реализации закона ЛЧМ на несущей или гетеродинной частотах. Система управления этим блоком построена так, что он может работать синхронно либо с каналом несущей частоты, либо с каналом гетеродина. Блок промежуточных частот вырабатывает ряд колебаний с частотой $F_{пч}$.

Блок опорных частот предназначен для получения сетки частот, необходимых для работы синтезатора и генерации частоты синхронизации внешних устройств. Предусмотрена возможность автоподстройки частоты колебаний опорных частот петлей ФАПЧ под внешнее высокостабильное колебание. В блок входит ЦВС, используемый в кольце ФАПЧ в качестве делителя с дробным переменным коэффициентом деления. Такая структура блока опорных частот позволяет снизить фазовые шумы, вносимые петлей ФАПЧ, за счет уменьшения коэффициента деления в петле, а также легко перенастраивать блок под любое новое значение тактовой частоты и подстраивать значение этой частоты в пределах тысячных долей герца для более точной реализации закона ЛЧМ.

Все узлы синтезатора работают под управлением контроллера, обеспечивающего прием и передачу команд компьютеру, загрузку данных в регистры ПЛИС в соответствующие моменты времени и контроль состояния различных узлов синтезатора.

Благодаря большой функциональной насыщенности современных специализированных СБИС, а также возможности построения систем управления на ПЛИС удалось унифицировать часть узлов, входящих в блоки синтезатора, что привело к сокращению номенклатуры компонентов, применяемых при построении устройства.

Синтезатор ЛЧМ-сигналов собран в конструктиве "Евромеханика 19". Все блоки, за исключением блока формирования опорных частот, смонтированы в одинаковых каскетах и объединены общей кроссплатой.

Для оперативного управления синтезатором разработано программное обеспечение, позволяющее быстро изменять параметры всех блоков и режимов работы устройства в соответствии с требуемыми значениями. Рабочие настройки синтезатора хранятся в файле и считываются из него. Оболочка программы представляет собой окно с несколькими вкладками, между которыми распределены функции управления. В одной из них (рис.3) задаются параметры синтезатора в целом: устанавливаются режимы его работы, значения частот, включается режим привязки к внешней опорной частоте и т.п.

Источники ошибок формирования сигнала в системе: ЦВС, непосредственно формирующий ЛЧМ-сигнал; квадратурный модулятор – переносчик сигнала ЦВС в ВЧ-область; тракты усиления и фильтрации сигнала. Для контроля качества формируемых ЛЧМ-сигналов разработано специальное устройство, позволяющее не только оценивать качество формирования сигналов в синтезаторе, но и контролировать сигналы во внешнем радиочастотном тракте. Ошибки формирования сигналов оцениваются по характеру и значению отклонения формируемых законов от заданных в результате измерения разности фаз опорного и разностных сигналов ($F_B - F'_B$), ($F_T - F'_T$) или опорного сигнала и сигнала внешнего тракта.

Накопленный опыт по разработке синтезаторов ЛЧМ- и НЧМ-сигналов позволяет строить устройства синтеза с полосой частот в несколько сотен мегагерц с оперативным изменением параметров модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тирней Дж., Рейдер Ч., Голд Б. Цифровые синтезаторы частоты. – Зарубежная радиоэлектроника, 1972, №3, с.57–74.
2. Кочемасов В.Н., Фадеев А.Н. Цифровые вычислительные синтезаторы двухуровневых сигналов с компенсацией фазовых ошибок. – Радиотехника, 1982, №10, с.15–19.
3. Кочемасов В.Н., Раков И.А. Цифровые вычислительные синтезаторы на основе фазовращателя с коммутацией отсчетов. – Электросвязь, 1988, №2, с.56–60.
4. Кочемасов В.Н. Компенсация шумов дробности в синтезаторах ЧМ-сигналов с дробным делителем с переменным коэффициентом деления. – Электросвязь, 1984, №3, с.54–56.

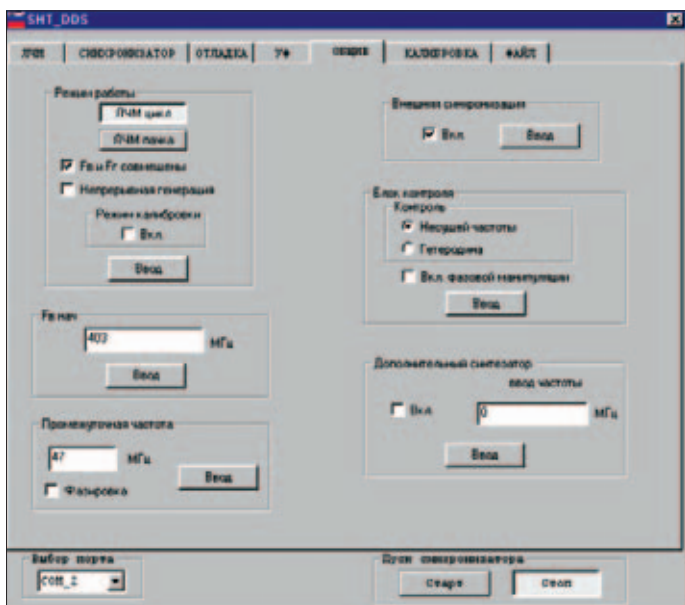


Рис.3. Окно оболочки программы