

ГЕНЕРАТОРЫ С ЦИФРОВОЙ НАСТРОЙКОЙ – ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

С. Дингес, к.т.н., В. Кочемасов, к.т.н. inbox@radiocomp.ru

СВЧ-генераторы и синтезаторы частот (СЧ) с быстрой перестройкой – ключевые компоненты многих радиосистем. Традиционные структуры используемых в них генераторов, управляемых напряжением (ГУН), имеют ряд ограничений, в частности, по быстродействию и линейности модуляционной характеристики [1]. Для преодоления этих ограничений были разработаны генераторы с цифровой настройкой (ГЦН) (Digitally Tuned Oscillator, DTO). Каковы возможности предлагаемых сегодня ГЦН?

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГЦН

В простом варианте ГЦН представляет собой комбинацию двух узлов: радиочастотного генератора, управляемого напряжением, и цифроаналогового преобразователя (ЦАП) (рис.1). Необходимый код установки частоты – слово цифровой настройки (digital tuning word) – подается в ЦАП, на выходе которого вырабатывается управляющее напряжение, устанавливающее требуемую частоту выходного колебания ГУН. В технической литературе такая структура перестраиваемого генератора получила обобщенное название "гибридная схема настройки" (hybrid tuning scheme) генератора с цифровым управлением.

В ГЦН используется термостатированный ГУН, не охваченный петлей обратной связи (с управлением в разомкнутой петле). Для коррекции погрешностей цифровой настройки ГУН применяется дополнительная цифровая калибровка устройства с использованием корректирующих кодов, сохраняемых при изготовлении генераторов в запоминающих устройствах (ЗУ).

Генераторы с цифровой настройкой обходятся значительно дешевле, имеют лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с традиционными синтезаторами, что позволяет использовать их в тех приложениях, где большинство функциональных возможностей СЧ не востребовано.

Среди недостатков ГЦН следует отметить повышенную потребляемую мощность, необходимую для термостабилизации, уход частоты

генерируемого колебания, происходящий после завершения настройки, и необходимость повторной калибровки устройства с течением времени.

Перечень эксплуатационных показателей ГЦН достаточно большой. К основным из них относятся:

- диапазон рабочих частот (Frequency Range), МГц;
- время установления выходной частоты (Frequency Settling Time), с;
- точность установки частоты (Frequency Accuracy), \pm МГц;
- величина посленастроечного дрейфа (ухода) частоты (PostTuning Drift) или температурный уход частоты (Frequency Drift), \pm МГц/°С;
- максимальное отклонение частоты в заданном временном интервале (Frequency Settling), \pm МГц;
- выходная РЧ-мощность (RF Output Power), дБм;
- диапазон модулирующих частот (Modulation Bandwidth);
- фазовый шум (Phase Noise) при определенной отстройке от несущей, дБн/Гц;
- уровень гармонических составляющих (Harmonics) на выходе генератора, дБн;
- уровень побочных составляющих (Spurious) на выходе генератора, дБн.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ГЦН НА ОСНОВЕ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Классическое решение для ГЦН, позволяющее обеспечить широкий диапазон перестройки по частоте и высокое быстродействие,

предусматривает применение в них нескольких переключаемых генераторов, управляемых напряжением, поступающим с выхода ЦАП. Такие ГЦН часто называют многодиапазонными (Multi Band). Их выпускают почти все ведущие производители данного класса СВЧ-компонентов (табл.1).

Примером широкополосного ГЦН на основе классической структуры может служить генератор с цифровой настройкой DTO-12000-50M (рис.2, 3), предлагаемый компанией National Instruments [2, 3]. Для перекрытия широкого диапазона перестройки ГЦН (от 9 до 15 ГГц) и обеспечения высокого быстродействия генератор DTO-12000-50M содержит три отдельных ГУН (см. рис.2) в одном компактном корпусе. Выбор ГУН в зависимости от требуемой частоты настройки производит декодирующее устройство переключателя диапазонов. Сигналы всех генераторов объединяются с помощью сумматора мощности Вилкинсона и поступают на общий выход устройства. Буферный усилитель на малощумящем полевом GaAs транзисторе поддерживает на выходе генератора уровни сигнала от 15 до 19 дБм во всем диапазоне настройки ГЦН. Буферный усилитель также обеспечивает хорошую развязку выхода генератора и подключаемой нагрузки. Диодный детектор в цепи выходного сигнала буферного усилителя используется для создания сигнала индикации состояния ГЦН.

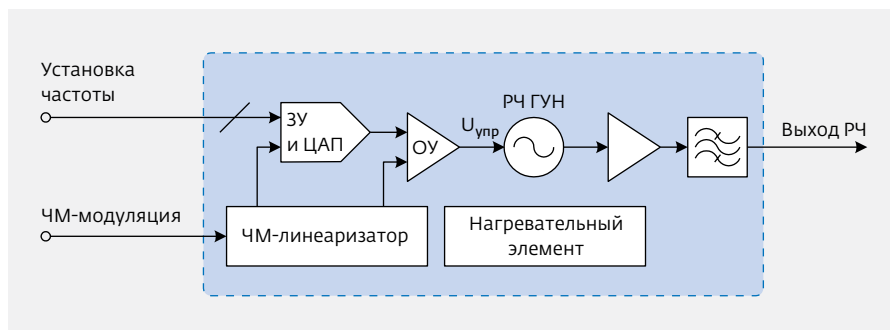


Рис.1. Обобщенная структура генератора с цифровой настройкой

ГУН, используемые в ГЦН, перестраиваются с помощью 12-битового параллельного слова цифровой настройки. Напряжения настройки ГУН линейризуются с помощью калибровочных коэффициентов, хранимых в электрически программируемом СППЗУ (EEPROM), для обеспечения линейности настроечной характеристики ГЦН и подаются на высококачественный ЦАП.

Компания API Technologies предлагает полную линейку заказных ГЦН, охватывающих общий диапазон частот от 2 до 18 ГГц (рис.4) [4]. Эти генераторы содержат необходимое количество поддиапазонных ГУН, в совокупности перекрывающих требуемый диапазон частот. Выходы РЧ-поддиапазонов выборочно подключаются к общему РЧ-выходу.

Компания Kratos-General Microwave производит несколько линеек ГЦН различного назначения (табл.2) [5]. Однодиапазонные устройства серии D60 охватывают диапазон частот 1-18 ГГц при использовании шести моделей ГЦН. По мере развития электронных технологий и совершенствования

Таблица 1. ГЦН производства зарубежных компаний

Компания-производитель	Диапазон частот, ГГц	Количество моделей	Количество ГУН в изделии
API Technologies	2,0-18,0	По требованиям заказчика	Нет информации
Crane Aerospace & Electronics	2-18 (0,5-20)	3	4; 7
Hunter Technology	2,0-18,0	1	3
Kratos-General Microwave	0,5-18,0	12	1-3
MicroKim	0,35-20,0	4	Нет информации
National Instruments	9,0-15,0	1	3
Planar Monolithics Industries	0,05-18,0	7	Нет информации
Syntonic Microwave	1,8-10,4	3	
Teledyne Cougar	0,5-18,0	По требованиям заказчика	

схемотехники устройства, разработчики добились того, что время установления частоты теперь менее 300 нс. Чтобы обеспечить точность установки частоты $\pm 1\%$, с учетом эффекта колебаний температуры, для ГУН потребовалось применение управляемого нагревателя и схемы компенсации температуры.

ГЦН серии D60 могут создавать частотно-модулированный (ЧМ) сигнал с девиацией более 15 МГц. Для формирования сигнала с аналоговой частотной модуляцией в ГЦН используется отдельный ЧМ-порт. Так как наклон модуляционной характеристики (кривой зависимости частоты ГУН от напряжения настройки) изменяется в полосе рабочих частот, необходима его коррекция для сохранения относительно постоянной величины девиации. Использование для вариации коэффициента ослабления аттенюатора ППЗУ, установленного в тракте сигнала модуляции, позволяет обеспечить коррекцию в пределах $\pm 5\%$.

Компания Kratos-General Microwave предлагает также многодиапазонные ГЦН для диапазонов частот 0,5–2, 2–6, 6–18 и 2–18 ГГц, предназначенные для использования в имитаторах РЧ-сигналов. С целью расширения частотного диапазона и увеличения скорости перестройки частоты в одном устройстве используются два или более ГУН. РЧ-переключатель с хорошей развязкой обеспечивает подавление на выходе устройства сигналов всех ГУН, кроме необходимого. Чтобы снизить уровни гармоник, на выходе используется

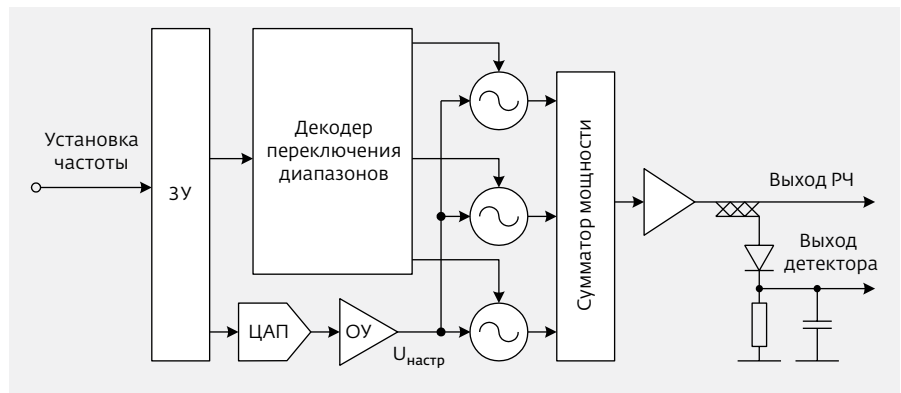


Рис.2. Структура широкополосного генератора с цифровой настройкой DTO-12000–50M компании National Instruments

переключаемый ФНЧ. Уровень гармоник для стандартных компонентов определен в -20 дБн, однако изделия с подавлением -55 дБн – один из вариантов поставки.

Устройства отличаются большой скоростью перестройки, высокой точностью и низким фазовым шумом. Благодаря модульной конструкции ГЦН у пользователя есть возможность выбрать при необходимости генератор более узкого частотного диапазона.

Компания Planar Monolithics Industries производит семь моделей ГЦН, перекрывающих общий частотный диапазон 0,05–18 ГГц [6] (табл. 3). Уровень фазового шума во всем диапазоне рабочих частот при отстройке 100 кГц равен -60 дБн/Гц, минимальная выходная мощность – 10 дБм. Для модели DTO-2G6G-CD-1 эти величины составляют -65 дБн/Гц и 2–8 дБм, соответственно.

Три модели ГЦН предлагает компания Crane Aerospace & Electronics [7]. В изделиях 6139–6566–00 (2–9 ГГц) и 6139–6564–00 (6–18 ГГц)



Рис.3. Конструктивное выполнение ГЦН DTO-12000–50M



Рис.4. Заказной ГЦН компании API Technologies

Таблица 2. ГЦН различного назначения компании Kratos-General Microwave

Модель	Диапазон частот, ГГц	Точность установки частоты, МГц	Макс. отклонение частоты в интервале 1 мкс, МГц	Тип ГЦН
D6010C	1–2	±2	±1	Однодиапазонные
D6020C	2–4			
D6026C	2,6–5,2	±3	±2	
D6040C	4–8	±4		
D6080C	8–12			
D6120C	12–18	±6	±3	
D6052	0,5–2	±2	±1,5	Многодиапазонные
D6206	2–6		±2 (6–12 ГГц) ±3 (12–18 ГГц)	
D6618	6–18			
D6218	2–18		±1,5 (2–6 ГГц) ±2 (6–12 ГГц) ±3 (12–18 ГГц)	
DC6206	2–6		±2	Компактные ГЦН для авиационных приложений
DC6618	6–18		±3	

используется по четыре поддиапазона, а в ГЦН 6139–6563–00 (2–18 ГГц) – семь. В этих генераторах предусмотрена аналоговая модуляция.

МНОГОДИАПАЗОННЫЕ ГЦН ДЛЯ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ

Многодиапазонные ГЦН, перекрывающие диапазон частот 2–18 ГГц, обладающие высокой скоростью перестройки, достаточной точностью установки параметров и низким фазовым шумом – ключевой компонент различных приложений радиоэлектронной борьбы, систем радиоперехвата (electronic

signal monitoring, ESM), приемников сигнализации о радиолокационном облучении (Radar Warning Receiver, RWR) и бортовой аппаратуры.

Компания Kratos-General Microwave разработала несколько вариантов многодиапазонных ГЦН для средств радиоэлектронной борьбы и радиотехнической разведки. Основные требования для таких ГЦН – компактность, малые уровни побочных и гармонических излучений и высокий уровень вибрационной устойчивости. Разработанные компанией генераторы С-Ku и S-C-диапазонов содержат три ГУН, столько же интегральных схем (ИС) СВЧ-усилителей, переключаемый фильтр нижних частот, заказную радиочастотную гибридную ИС и компоненты для РЧ- и ЭМС-фильтрации.



Рис.5. Мониторинговый комплекс SOR компании Teledyne Cougar

Таблица 3. ГЦН компании Planar Monolithics Industries

Модель	Диапазон частот, ГГц	Точность установки частоты, МГц	Дрейф частоты, ±МГц/°С	Макс. отклонение частоты, ±МГц, в интервале 1 мкс	Модулирующие частоты, (мин.), МГц	Уровень гармоник, дБн
AUM-50M100M-DТОК-3R5MBW	0,05–0,1	2,0	<0,1	1,0	3,5	-20
AUM1001G-DТОК-3R5MBW	0,1–1,0	2,0	<0,1			
DTO-0R5G2G-CD-1	0,5–2,0	2,5	0,1	2,0	0–9	
DTO-0R5G2D5G-CD-1	0,5–2,5	2,5			0–9	
DTO-2G6G-CD-1	2–6,0	2,0		2,5	0–14	-45
DTO-6G18G-CD-1	6,0–18,0	2,5		4,0	0–10	-55
DTO-218-CD-1	2,0–18,0	2,0		3,0	0–9	-20

Компания Teledyne Cougar выпускает мониторинговый комплекс SOR (Set-On-Receiver) (рис.5) [8], одним из основных компонентов которого является специализированный ГЦН. В состав устройства входят также приемник мгновенного измерения частоты (Instantaneous frequency measurement, IFM) и цифровой процессор (рис.6). Этот широкополосный комплекс, используемый в системах радиоэлектронной борьбы, обеспечивает быструю установку частоты в устройствах создания помех радиолокационным станциям.

Приемник SOR опознает сигналы угрожающего радара и создает преднамеренную модулированную активную помеху на его частоте. Для измерения частоты сигнала угрожающего радара достаточно 80 нс с момента его появления, после чего модулированный шумом ГЦН настраивается на ту же частоту в течение 250 нс. Таким образом,

от быстродействия ГЦН зависит эффективность SOR. Такой управляемый микропроцессором и полностью программируемый комплекс высокоэффективен при подавлении радаров со скачками по частоте.

Для использования в СВЧ-радиооборудовании различного назначения компания Teledyne Cougar предлагает полную линейку ГЦН, охватывающих полосу частот 0,5–18 ГГц [9]. Настраиваемые на любую рабочую частоту менее чем за 1 мкс генераторы имеют очень малый посленастроечный дрейф и время установления частоты. В устройствах предусмотрено использование линеаризованной фазовой модуляции.

ДВУХРЕЖИМНЫЕ МОДУЛИ – ГЦН/СИНТЕЗАТОР

Ряд компаний выпускает РЧ-компоненты, которые могут работать в двух режимах: как ГЦН или

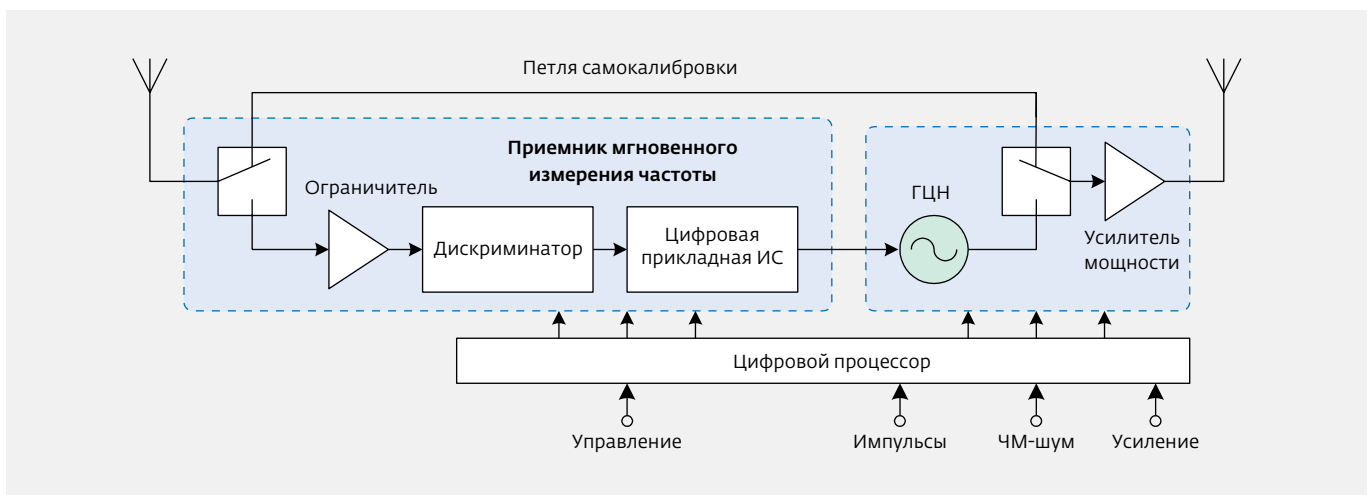


Рис.6. Структура SOR компании Teledyne Cougar



Рис.7. Двухрежимный модуль 7730A компании MicroKim

как синтезатор частот (DTO/Synthesizer module). Достоинством первого режима является высокое быстродействие, а второго – высокая стабильность частоты. При этом время переключения на новую частоту в этих режимах существенно различается.

Примером реализации такого подхода может служить предлагаемый израильской компанией Elisra Group двухрежимный модуль



Рис.8. Имитаторы РЛС компании AWT Global: портативный серии MRS-020180 (а) и смонтированная в стойку система (б)

MW 15100–9.8–10-D/S с рабочим диапазоном 9,8–18,0 ГГц [10]. Для установления частоты в режиме ГЦН требуется 2,5 мкс, а в режиме синтезатора – уже 50 мкс, т.е. в 20 раз больше. Шаг сетки частот (Resolution) составляет 167,14 кГц, стабильность частоты при использовании внутреннего опорного генератора равна ± 25 ppm. Уровень гармоник не превышает -45 дБн, уровень побочных

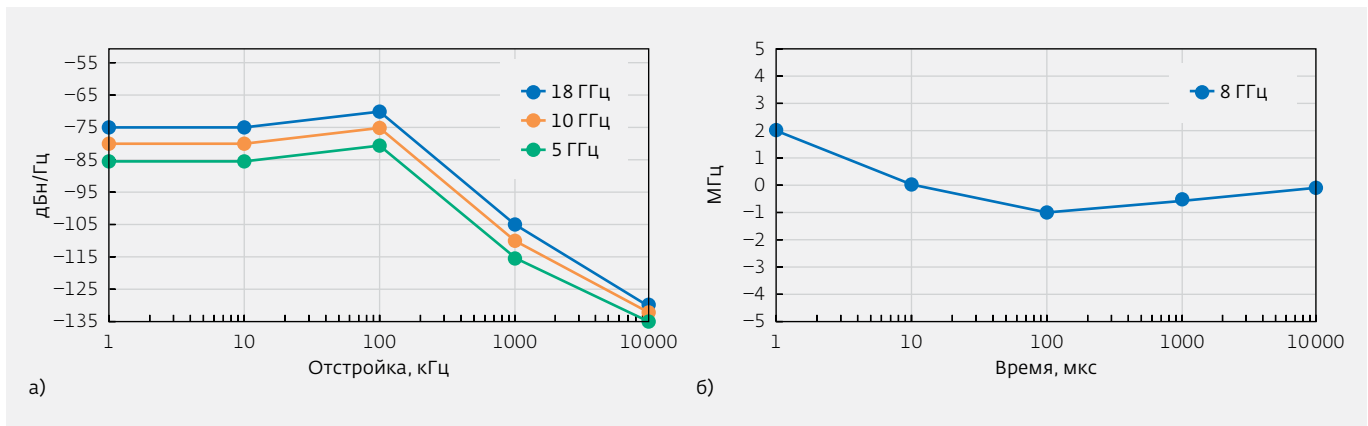


Рис.9. Типовая шумовая (а) и посленастроечная частотная (б) характеристики SYN-A

излучений в диапазоне 2–18 ГГц не хуже –65 дБн при отстройке >10 МГц.

Компания MicroKim – один из ведущих мировых производителей СВЧ-оборудования [11] – выпускает ряд компактных широкополосных модулей ГЦН: 7319A (0,5–2 ГГц), 7735A (2–18 ГГц). Широкополосные двухрежимные модули (рис.7) перекрывают диапазон частот 2–18 ГГц (7738L) и 0,5–20 ГГц (7730A), стабильность частоты в режиме синтезатора составляет $1,5 \cdot 10^{-6}$ (7738L) и $2 \cdot 10^{-6}$ (7730A). В режиме ГЦН все выпускаемые компанией модули показывают время установки не более 1 мкс, их выходная мощность изменяется в диапазоне 8–13 дБм. Для управления модулями используются 16-битовые данные. В модели 7738L применена линеаризация настроечной характеристики (FM Linearized Modulation) с использованием 13-битового слова. Модель 7730A рекомендована производителем для применения в радарных имитаторах и тренажерах радиоэлектронной борьбы.

Схема с двумя режимами работы используется также в имитаторах РЛС производства компании AWT Global (рис.8). В них может быть установлено до восьми блоков, сочетающих ГЦН и синтезатор [12]. Устройства, выпускаемые этой компанией, могут формировать до 128 видов непрерывных или импульсных сигналов. Рабочие диапазоны имитатора адаптируются к техническим требованиям потребителя в полосе 0,5–40 ГГц.

Двухрежимная концепция реализована и компанией Hunter Technology в изделии SYN-A [13]. Устройство может функционировать как синтезатор частот и генератор с цифровой настройкой, перекрывая диапазон частот от 2 до 18 ГГц на одном выходе. В режиме ГЦН время перестройки устройства составляет 2 мкс, в режиме синтезатора – 50 мкс. SYN-A позволяет реализовывать частотную

модуляцию с девиацией более 200 МГц в любой точке диапазона 2–18 ГГц. Функция поверки в условиях эксплуатации (field calibrate function) дает возможность значительно улучшить шумовые характеристики устройства (рис.9а) и уменьшить посленастроечный уход частоты до величины меньшей ± 1 МГц (рис.9б) во всем диапазоне рабочих температур.

Таким образом, сегодня предлагается целый ряд ГЦН с различными характеристиками. И пользователи могут выбрать устройство, оптимальное для их приложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Iniewski K.** Wireless Technologies: circuits, systems, and devices. CRC Press, 2007.
2. **Browne J.** DTO Steps Quickly Across 9 To 15 GHz. – RF Design. Defence Electronics. A Special Section to Microwaves & RF and Electronic Design. March/April 2010.
3. Сайт компании National Instruments: www.ni-microwavecomponents.com.
4. Сайт компании API Technologies: <http://micro.apitech.com/dto.aspx>.
5. Сайт компании Kratos-General Microwave: www.kratosepd.com.
6. www.pmi-rf.com/products/dto/standardmodels.htm.
7. Сайт компании Crane: www.craneeae.com.
8. www.teledyne-cougar.com/pdfs/download/IntSubassembliesWEB.pdf.
9. Сайт компании Teledyne Cougar: www.teledyne-cougar.com.
10. Сайт компании Elisra: www.mw-elisra.com.
11. Сайт компании MicroKim: www.microkim.com.
12. Сайт компании AWT Global: www.awt-global.com.
13. Сайт компании Hunter Technology: www.hunterpcb.com; www.hunter-technology.com.