

**Самохин С.А., Горюнов И.В., Сердюков С.А.,
Мякиньюков В.Ю., Ковтунов Д.А.**
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Синтезатор частот С - Х - диапазона для бортовой аппаратуры.

Представлены результаты разработки синтезатора С - Х - диапазона для применения в бортовой аппаратуре. Изложены конструкторские решения по реализации широкополосного СЧ с малыми габаритными размерами, высоким уровнем развязки между выходами, с высокой линейностью АЧХ и низким уровнем побочных внеполосных излучений на всем диапазоне (4-12.5 ГГц). Представлена структурная схема изделия. Рассмотрены различные способы технологической реализации.

Ключевые слова: синтезатор частот, СВЧ, высокая линейность АЧХ, низкий уровень побочных внеполосных излучений.

Введение

Синтезатор частот (СЧ) - устройство, способное формировать из опорной частоты на выходе требуемую частоту или набор частот, согласно управляющим сигналам. Наиболее распространенными являются следующие методы синтеза частот:

- прямой аналоговый синтез
- косвенный синтез
- прямой цифровой синтез
- гибридный синтез

Каждый из этих методов синтеза частот имеет преимущества и недостатки, следовательно, для конкретного изделия нужно делать выбор, основанный на наиболее приемлемой комбинации компромиссов.

К основным параметрам, характеризующим качество СЧ, относятся:

- Рабочий диапазон частот
- Время перестройки частоты
- Уровень подавления паразитных составляющих спектра выходного сигнала
- Перепад выходной мощности
- Рабочий диапазон температур
- Шаг сетки рабочих частот
- Габаритные размеры

Принимая во внимание требования к разработке, выбор был сделан в пользу косвенного синтеза, т.к. таким СЧ свойственна высокая скорость перестройки по частоте, за счёт использования генераторов, управляемых напряжением (ГУН). Такие синтезаторы

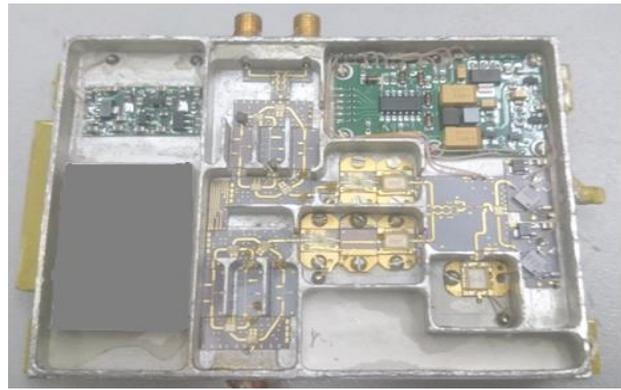
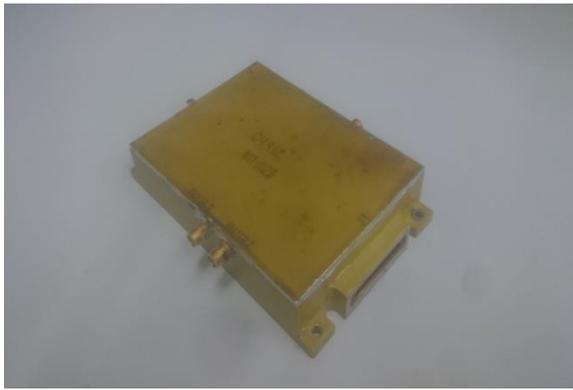


Рис.1.

Принцип работы заключается в переключении двух ГУН на общую нагрузку, обеспечивая полный диапазон выходных частот с требуемым шагом перестройки, быстродействием и уровнем ПСС. В настоящем изделии применены ГУН фирмы Hittite HMC586LC4B(4-8ГГц) и HMC588LC4B(8-12,5ГГц), которые наилучшим образом подошли под требуемые параметры по частоте и крутизне. В каждый момент времени включенным оказывается только один ГУН, подключённый в СВЧ тракт изделия через МИС переключателя M44240, с диапазоном рабочих частот 0,2...18 ГГц и прямыми потерями не более 3дБ. Далее, сигнал включенного ГУН делится пассивными делителями на три канала - канал обратной связи петли ФАПЧ, основной канал и канал гетеродина. Два последних отличаются друг от друга только значением выходной мощности. Для достижения необходимого уровня развязки между выходами СЧ, каналы выполнены в виде отдельных трактов и после герметизации изделия оказываются полностью изолированными по СВЧ сигналам. Герметизация изделия выполняется методом «перевернутой крышки», что легко обеспечивает необходимый результат. Для достижения требуемой неравномерности АЧХ, цепочки усилителей каждого из каналов вводят в режим глубокого насыщения, что в свою очередь, неминуемо приводит к обогащению спектра выходного СВЧ сигнала, в том числе и за счёт роста уровней 2 и 3 гармоник, попадающих в рабочий диапазон СЧ из ГУН первого поддиапазона. Для их подавления, в каждый из СВЧ трактов были введены по три отдельных ФНЧ с различными частотами среза, что должно было обеспечить необходимое подавление нежелательных ПСС. ФНЧ поочередно подключались в тракт СВЧ сигналов при помощи тех же МИС переключателей M44240.

Однако практическая реализация такой схемы выявила ряд серьёзных недостатков, таких как: недостаточный уровень подавления гармонических составляющих, недостаточная линейность АЧХ. Превышение уровня паразитных составляющих в спектре выходного сигнала, трудности технологического характера.

Для устранения выявленных недостатков было решено доработать существующий вариант структурной схемы, а именно - для подавления гармонических составляющих ГУН HMC586LC4B(4-8ГГц) попадающих в рабочий диапазон СЧ, введены перестраиваемые фильтры ФНЧ HMC882LP5E, в тракт ГУН и в выходные тракты изделия. Добавлены усилители с управляемым коэффициентом усиления, в цепи предварительного усиления и в цепи канала гетеродина, что позволило использовать усилители мощности обоих трактов СВЧ в режиме, близком к линейному. Для решения тех. проблем были разработаны и применены топологии плат для подложек из Rogers, что позволило полностью автоматизировать сборочный процесс СВЧ плат. В изделии применена полностью корпусированная элементная база, что заметно повышает надёжность и технологичность СЧ. На рис.2 показан сборочный чертёж этого варианта реализации и его структурная схема.

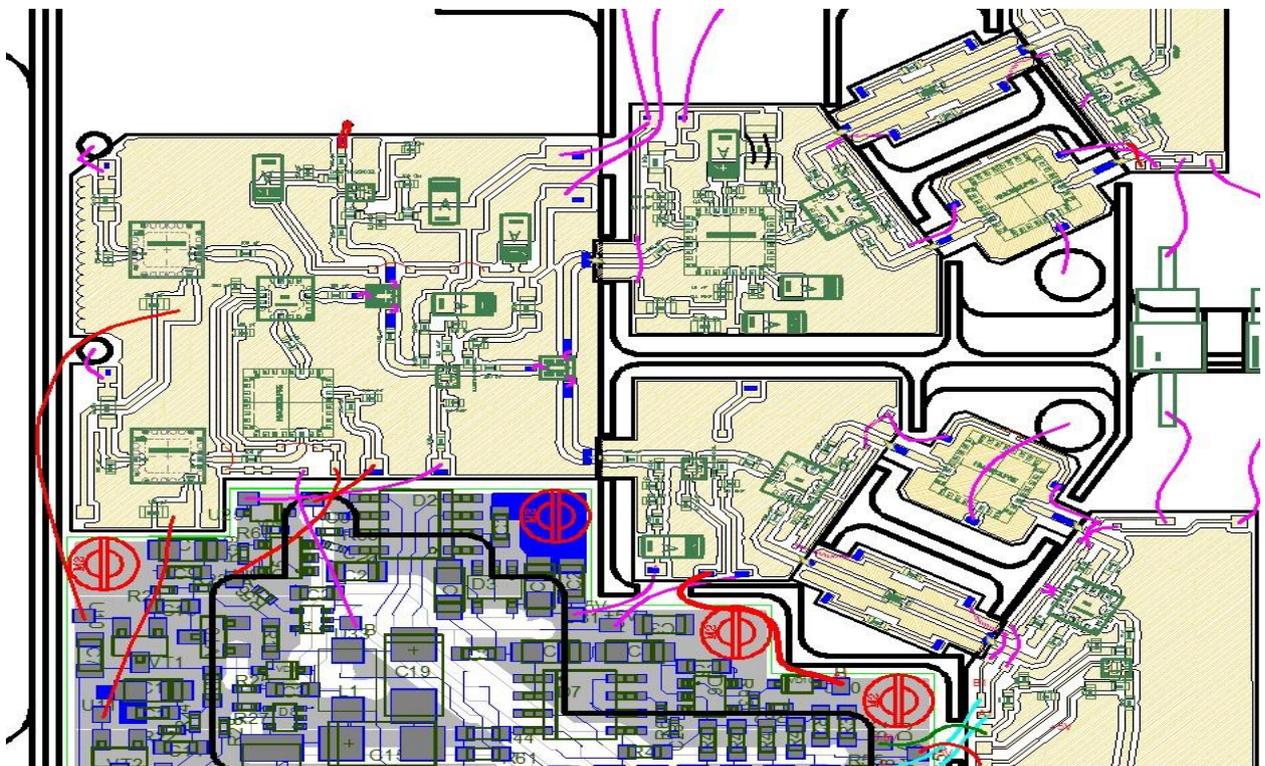
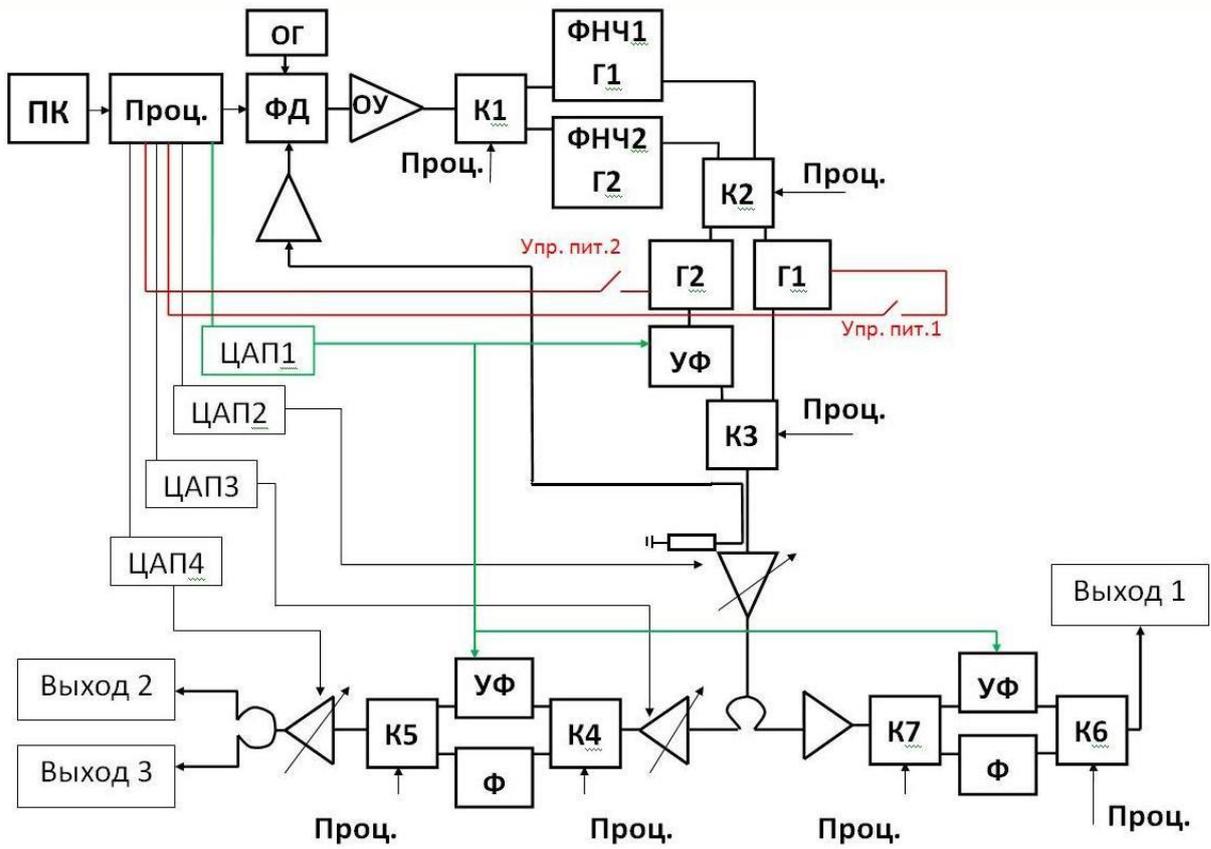


Рис.2

Для синхронизации любого из ГУН используется одна и та же петля ФАПЧ с переключаемыми ФНЧ. В качестве микросхемы синтезатора была выбрана НМС702, работающая в режиме с дробным коэффициентом деления и использующая частоту сравнения фазового детектора 10 МГц, равную частоте опорного генератора. В СЧ применён термокомпенсированный кварцевый генератор с уровнем фазовых шумов -135 дБ/Гц на отстройке 1 кГц. Полученные значения уровня фазовых шумов находятся в пределах -80дБ/Гц на отстройке 10 кГц при шаге 1 МГц. Ширина полученной петли ФАПЧ 180 кГц при токе ФД =2 мА. На рис.3 показана плата ФАПЧ разработанного СЧ.



Рис.3

Расчетное время перестройки частоты СЧ с края на край диапазона не превышает 55 мкс. Однако реальное время переключения достигает 160 мкс и определяется постоянной времени вкл/выкл источников питания ГУН. В пределах полосы перестройки любого из ГУН, время переключения частоты соответствует расчетному.

Для обеспечения минимального перепада мощности во всем диапазоне рабочих частот, в трактах СВЧ сигнала использованы усилители с переменным коэффициентом усиления, индивидуально калибруемые для каждого образца СЧ и управляемые микроконтроллером. Для облегчения калибровки мощности изделия была разработана и применялась специальная программа, позволяющая вводить калибровочные коэффициенты(КК) непосредственно через разъём управления частотой (рис.4).

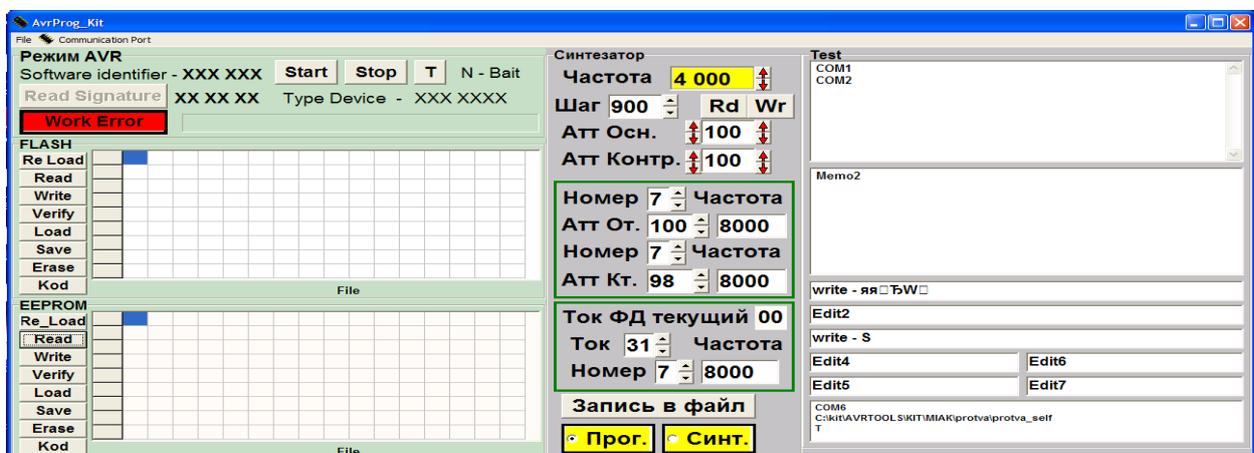


Рис.4

Это позволило корректировать перепад выходной мощности СЧ после процесса герметизации и в ходе испытаний. В настоящий момент предусмотрено программное разбиение частотного диапазона СЧ, на участки по 64 МГц. На каждом участке вводится только одно значение КК, чего оказалось достаточно для достижения необходимой равномерности АЧХ и было подтверждено экспериментально (программа адаптирована под различное кол-во разбиений, в зависимости от предъявляемых требований по неравномерности). Для обеспечения стабильной выходной мощности в диапазоне рабочих температур, использован температурный датчик AD590. Процесс калибровки начинается с ввода КК при температуре окружающей среды +25°C. Далее производят замер неравномерности АЧХ в интервалах температур (-60..+25) °C и (+25..+85)°C, затем для каждого интервала в программу вводится по одному температурному КК. В итоге при изменении температуры окружающей среды программа автоматически аппроксимирует значение КК в ту или другую сторону, обеспечивая стабильную выходную мощность во всём диапазоне СЧ при изменении температуры окружающей среды от -60°C до +85°C. На рис.5 представлен полученный результат по неравномерности АЧХ данного СЧ при н.у. При воздействии повышенной и пониженной температуры характеристика остается прежней, при незначительном изменении абсолютного значения выходной мощности.

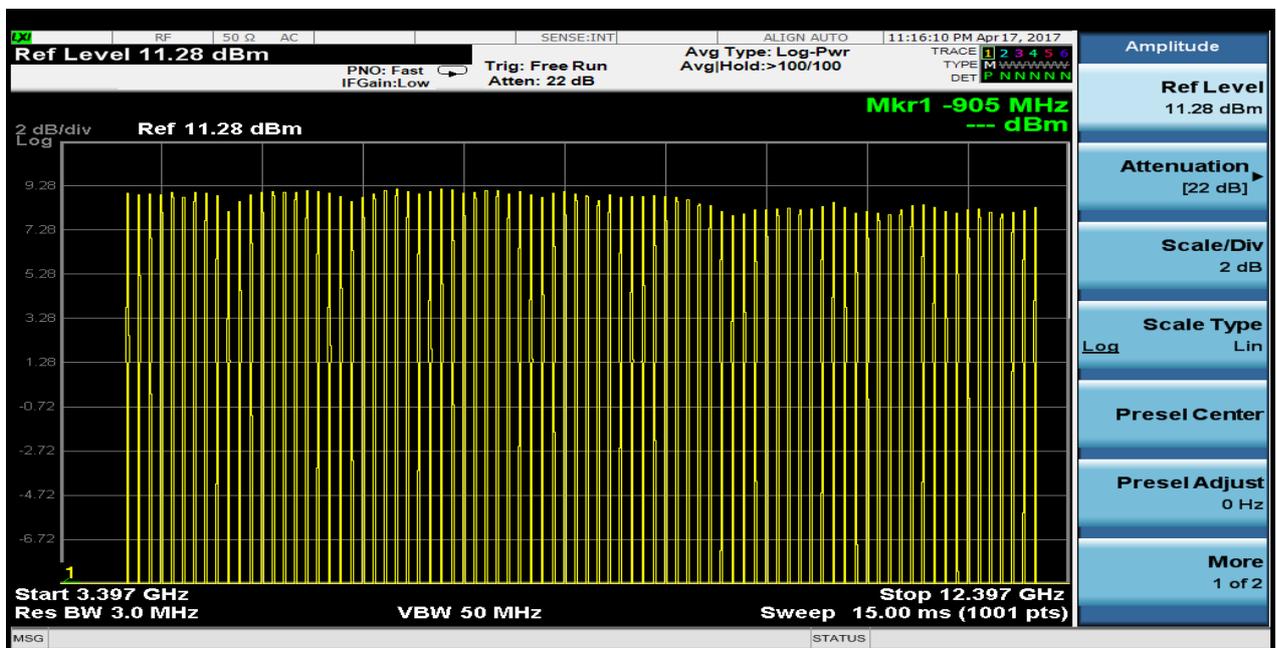


Рис.5

Полученные значения:

- диапазон рабочих частот, ГГц.....4-12.5
- перепад выходной мощности, дБ1.5
- уровень подавления паразитных составляющих спектра выходного сигнала, дБ60
- габаритные размеры, мм100×20×75
- шаг сетки рабочих частот, МГц.....1
- рабочая температура, °C-60...+85
- развязка с разъёма Выход 1 на разъёмы Выход 2, Выход 3, дБ.....60

- развязка с разъёма Выход 2 на разъём Выход 3, дБ.....30
- потребляемая мощность, Вт.....8.4

Принимая во внимание тенденцию к постепенной замене импортной элементной базы на отечественную, можно сказать, что уже в настоящее время аналогичная структурная схема СЧ, как вариант, может быть реализована на отечественной элементной базе, с применением ГУН, разрабатываемых ОАО «Метеор» в ходе ОКР «Пьеза И4-РК», микросхемы ФАПЧ 1288П1У российской компании «Элвис» и процессоров российской компании «Миландр». Однако такой СЧ будет реализован с некоторым ухудшением электрических параметров.

Заключение

Разработанный СЧ позиционируется как гетеродин, работающий в составе аппаратуры РЭП. Совокупность технических характеристик и малые габаритные размеры, делает разработанный СЧ достойным изделием в классе встраиваемых широкополосных СВЧ-синтезаторов для этой аппаратуры. К настоящему моменту изготовлено и успешно интегрировано в состав бортовой аппаратуры более 200 изделий.

Библиографический список.

1. Пётр Бобкович, Андрей Кузменков. Отечественный синтезатор частот с высоким быстродействием и низким уровнем фазовых шумов, Современная электроника, № 2 2015, с.2-6
2. Александр Аредов, Евгений Маркосян. Особенности проектирования широкополосных синтезаторов частот на основе ФАПЧ с интегрированным ГУН, компоненты и технологии, № 11 '2015, с.84-86
3. www.analog.com