

УДК

«Практические результаты создания измерительного СВЧ оборудования в диапазоне частот до 40 ГГц»

А.В. Байкин, А.Н. Сафронов

ООО «Миг Трейдинг»

Аннотация: в данной работе представлены результаты создания модуля расширения частотного диапазона генератора и генератора СВЧ сигналов с частотными диапазонами до 40 ГГц. Освещаются способы решения основных технических задач, в том числе, сверхширокополосного согласования, минимизации потерь, обеспечения развязок в СВЧ тракте.

Ключевые слова: аналоговый СВЧ генератор MBG100A, модуль расширения частоты EMG-40A, сверхширокополосное согласование, чистота спектра, развязка в СВЧ тракте

Введение

При исследованиях, разработке и производстве перспективных радиоэлектронных систем, частотный диапазон до 40 ГГц является наиболее востребованным. Прогресс по таким направлениям, как: радиолокация, радионавигация, системы связи, спутниковые системы, медицина, биология, автомобильные системы помощи водителю, малые радиолокационные станции (РЛС) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) тесно связан с использованием миллиметровых длин волн применяемых сигналов. Освоение частотного диапазона до 40 ГГц требует наличия современного парка отечественного измерительного оборудования, в том числе, высококачественных источников СВЧ сигналов для измерительных трактов.

Компания Миг Трейдинг решила поставленную задачу в два этапа. Первый – разработано СВЧ устройство (модуль EMG-40A), применяемое совместно с генератором до 20 ГГц, для расширения его частотного диапазона до 40 ГГц. Второй – разработан СВЧ генератор MBG100A с частотным диапазоном 100 кГц – 40 ГГц.

Экспериментальные результаты решения принципиальных технических задач по двум направлениям:

1. Сверхширокополосное согласование в СВЧ тракте. В модуле расширения – полоса частот 100 МГц – 40 ГГц, более восьми октав, в генераторе до 40 ГГц – более 19 октав.
2. Минимизация потерь в СВЧ тракте. Для получения приемлемых значений СВЧ выходной мощности, для минимизации количества компенсирующих усилительных каскадов, приводящей к повышению надежности и качества устройства, для оптимизации массогабаритных показателей и КПД устройства – потери по мощности в СВЧ тракте должны быть минимально возможными.

Эти первые две задачи решались, в том числе за счет тщательного выбора архитектуры устройств и выверенных схемотехнических решений. Но главный вклад внесла разработка сверхширокополосной линии передачи [1] с волновым сопротивлением 50 Ом, реализованной в печатной плате на материале RT/Duroid 5880, рисунок 1. Удалось достичь уровня прямых потерь, при длине тракта 3 см, в диапазоне до 40 ГГц – не более 2,5 дБ; в диапазоне до 110 ГГц – не более 5 дБ, рисунок 2.

Значение КСВН в диапазоне до 40 ГГц составило не более 1,05; в диапазоне до

100 ГГц – не более 1,4.

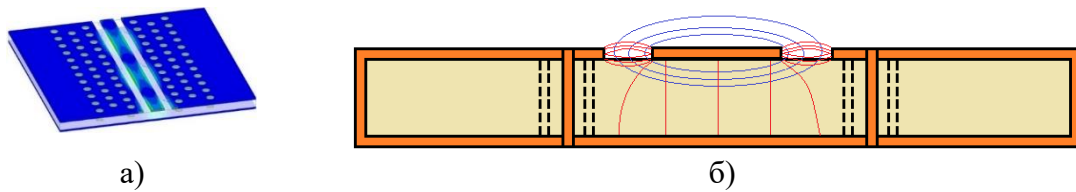


Рисунок 1. Линия передачи. а) расчетная 3D – модель, б) схематично в разрез

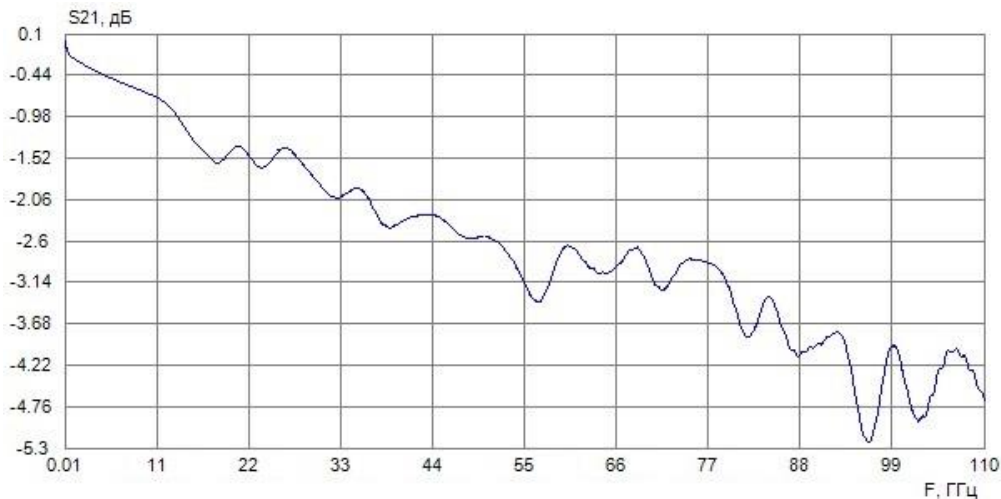


Рисунок 2. Измеренная АЧХ линия передачи до 110 ГГц

Разработанная и запатентованная сверхширокополосная линия передачи представляет собой копланарный волновод с заземлением и заземленными обратными проводниками. Заземление обратных проводников обеспечивается тремя рядами сквозных металлизированных отверстий. При разработке линии передачи оптимизировались следующие параметры: диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрика (СВЧ ламинат Rogers), ширина сигнального проводника, величины зазоров между проводниками, диаметры и порядок расположения заземляющих отверстий.

Сверхширокополосное согласование СВЧ трактов обеспечил также, принцип «один СВЧ модуль – одна плата». Данный способ проектирования позволил исключить разбиение СВЧ модуля на отдельные функциональные узлы с большим количеством межузловых соединений – перемычек. Это стало возможным, благодаря применению многослойной топологии и двустороннему поверхностному монтажу печатных плат. Причем, СВЧ и низкочастотные (питание и управление) цепи разнесены на разные стороны одной платы, для исключения нежелательного взаимного электромагнитного влияния.

В том числе, разработанная линия передачи позволила: применять при ее изготовлении легко-масштабируемую технологию изготовления печатных плат (РСВ), применять совместно высокопроизводительную технологию поверхностного монтажа элементов (SMD), обеспечить высокую степень интеграции с доступной элементной базой (в т.ч. с кристаллами), обеспечить низкую стоимость изготовления.

Высокий уровень развязок на СВЧ. В модуле расширения умножительный тракт состоит из трех переключаемых каналов с частотами от 20 до 40 ГГц. Для исключения их взаимного электромагнитного влияния необходимо надежно экранировать каналы друг от друга. В генераторе применяется сложнейший по схемотехнике СВЧ тракт с предельными параметрами (например, запирающие 120 дБ в широкой полосе частот),

поэтому задача обеспечения развязок еще более актуальна.

С большей частью задач по уменьшению нежелательных электромагнитных связей справляется вышеописанная запатентованная линия передачи. Все дело в том, что в заземленном копланарном волноводе электрическое поле концентрируется в зазорах между сигнальным полоском и заземленными обратными проводниками, рисунок 1б. В меньшей степени поле присутствует в слое диэлектрика между сигнальным проводником и нижней земляной стенкой. Это приводит к существенному уменьшению потерь на излучение в пространство по сравнению, например с полосковой и микрополосковой линиями передачи.

В генераторе MBG100A и модуле расширения EMG-40A применяется линия передачи, выполненная по вышеописанному конструктиву, но с применением материала Rogers 4003, толщиной 0,203 мм и диэлектрической проницаемостью 3,38. Но был разработан и ее второй вариант, который также приведен в патенте на изобретение, рисунок 3.

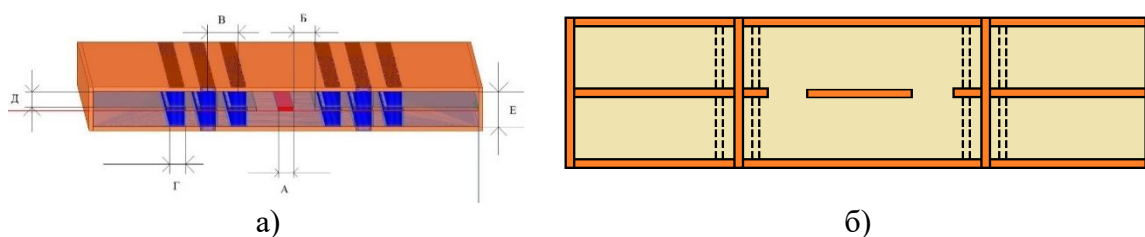


Рисунок 3. Линия передачи с верхней заземленной стенкой. а) расчетная 3D – модель, б) схематично в разрезе

В нем, над проводящим полоском, располагается дополнительный слой диэлектрика и верхняя земляная стенка (материал Rogers 4003). Нижний слой диэлектрика и земляная стенка выполнены на материале Rogers 4450. Таким образом, уменьшаются прямые потери и возрастает эффективность подавления паразитных мод вдоль проводящего полоска. Данные марки материалов не обладают такими высокочастотными свойствами, как в первом варианте линии, поэтому оптимизация проводилась в диапазоне частот до 40 ГГц. В экспериментальном образце длиной 3 см удалось достичь значений прямых потерь в диапазоне до 40 ГГц – не более 0,7 дБ, рисунок 4.

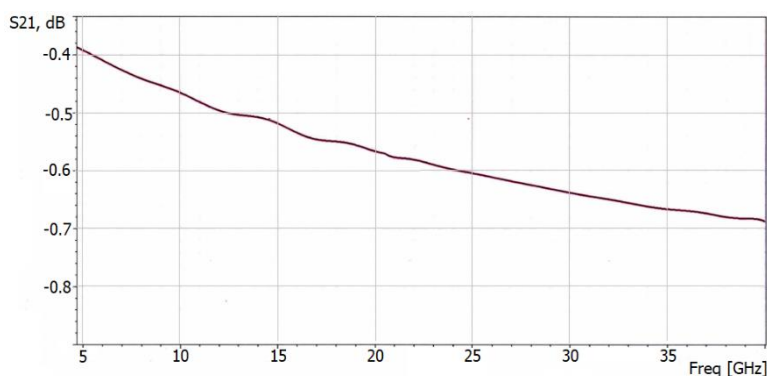


Рисунок 4. Расчетная АЧХ линии передачи с верхней заземленной стенкой

Кроме возможностей линии передачи, в вопросе обеспечения развязок на СВЧ, применяем такие методы, как: фильтрация цепей питания и управления, организация аналогов запердельных волноводов над открытыми линиями передачи, конструктивные особенности корпусов СВЧ модулей, оптимизация компоновки, применение радиопоглощающих материалов.

Описанные технические решения позволили создать СВЧ модуль – электронно-управляемый Атенюатор, с величиной ослабления сигнала: в полосе частот 100 кГц – 20 ГГц - 120 дБ (шаг 0,5 дБ для модуля и 0,01 дБ для генератора); в полосе частот 20 ГГц – 40 ГГц - 100 дБ, рисунок 5. Таким образом, при максимальной выходной мощности генератора сигналов MBG100A -120 ÷ 27дБм, динамический диапазон по мощности составляет 147 дБ.

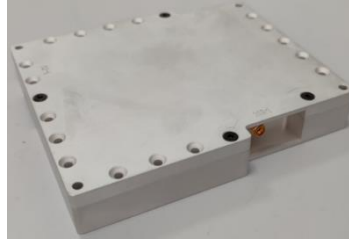


Рисунок 5. Фото СВЧ модуля «Атенюатор» из состава генератора MBG100A

Чистота спектра выходного сигнала. В обоих устройствах, являющихся источниками СВЧ сигнала, предъявляются высокие требования к уровню подавления побочных спектральных составляющих.

В генераторе имеется базовый СВЧ модуль – селектор сигналов, и опциональный – фильтр гармоник. Модуль Селектор сигналов предназначен для фильтрации побочных продуктов встроенного синтезатора частот. Его схема состоит из 12 коммутируемых каналов фильтрации с фильтром нижних частот в каждом, рисунок 6а. Модуль Фильтр гармоник предназначен для дополнительного снижения уровня гармоник выходного сигнала, Рис. 6б.

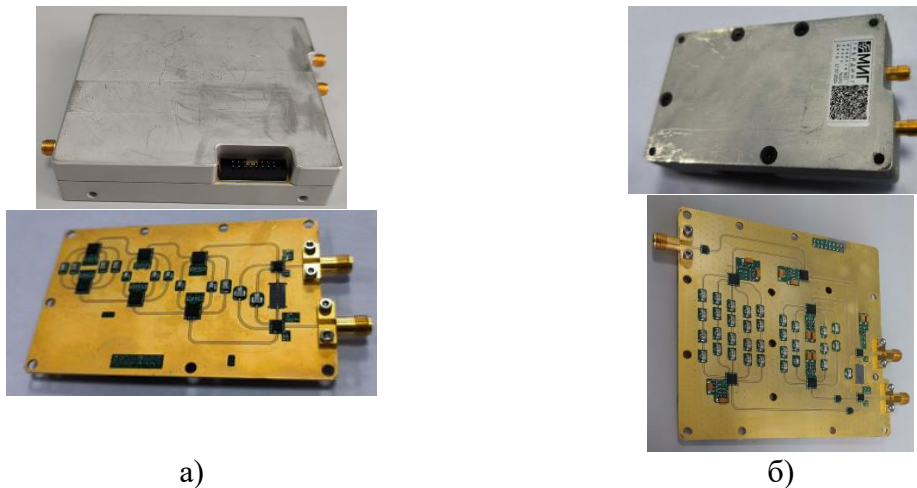


Рисунок 6. Фото СВЧ модулей из состава генератора MBG100A. а) «Селектор сигналов», б) «Фильтр гармоник»

Уровень гармонических составляющих выходного сигнала в генераторе MBG100A составляет: в базовом оснащении – 50 дБ, с опцией фильтра гармоник – 80 дБ.

В модуле расширения обеспечивается фильтрация субгармонических составляющих выходного сигнала. С этой целью были разработаны и запатентованы микрополосковые фильтры [2], выполненные на керамике Al_2O_3 (поликор) с диэлектрической проницаемостью 9,6. Фильтры выполнены на комбинациях связанных линий, рисунок 7а. При расчетах пришлось отказаться от фильтров-прототипов, по причине ухудшения характеристик фильтров в результате

приближений и аппроксимаций при переходе к цепям с распределенными параметрами. Поэтому был применен метод прямого синтеза на основе электромагнитного моделирования в среде Ansoft HFSS. В результате получились фильтры с сильной емкостной связью не только по боковой стороне резонаторов, но и по торцевым частям резонаторов, расположенных через один, в шахматном порядке, рисунок 7б.

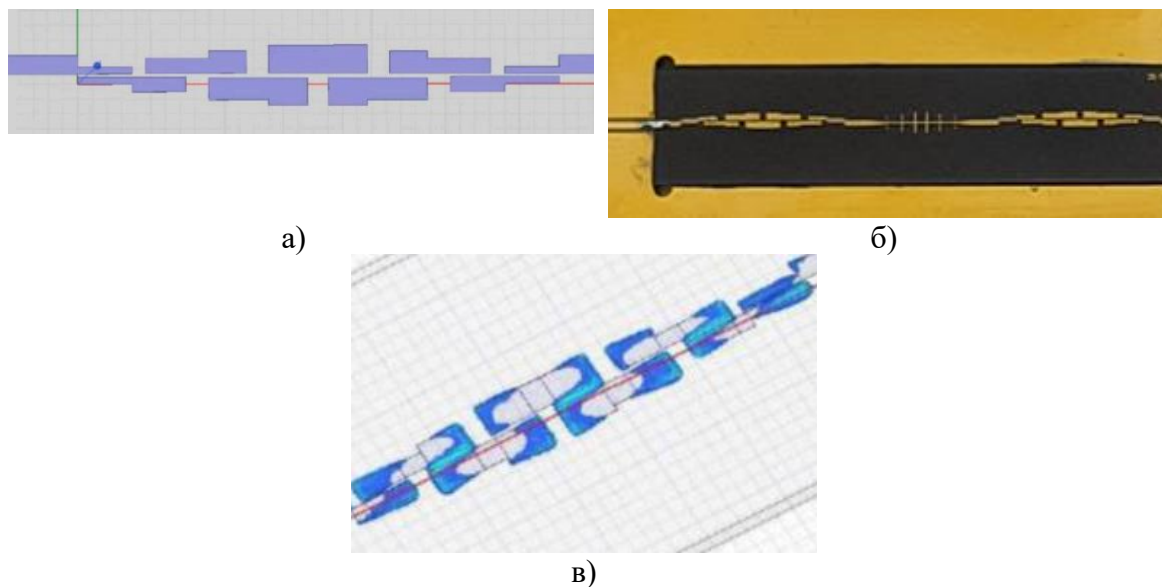


Рисунок 7. Фильтр из состава модуля EMG-40A. а) топология, б) распределение поля, в) фото связки ППФ+ФНЧ+ППФ

В модуле расширения, в каждом из трех каналов умножения, применяется соответствующая топологическая связка из полосовых фильтров и ФНЧ для расширения полосы заграждения и увеличения подавления в ней. На рисунке 8 приведена измеренная АЧХ самой высокочастотной связки ППФ+ФНЧ+ППФ, применяемой в модуле расширения EMG-40A.

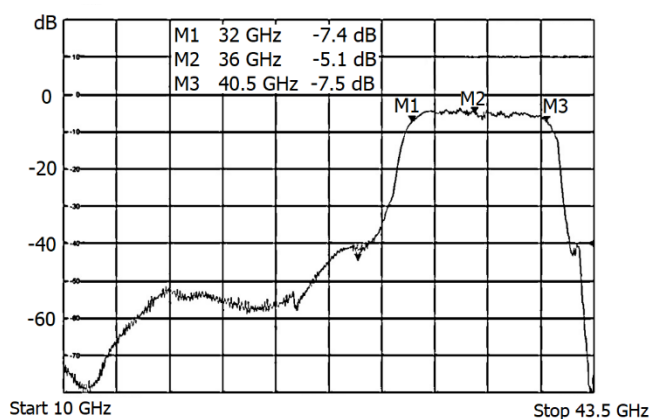


Рисунок 8. Измеренная АЧХ связки ППФ+ФНЧ+ППФ из состава модуля EMG-40A.

При помощи данных фильтров в модуле расширения EMG-40A удалось добиться уровня субгармонических составляющих выходного сигнала -80 дБ. Калиброванная выходная СВЧ мощность, прецизионность установки.

Модуль расширения вносит максимум 1,2 дБ в абсолютную погрешность установки выходной мощности в диапазоне значений от -40 до +19 дБм. Генератор

фактически обеспечивает 1,5 дБ относительной погрешности установки выходной мощности в диапазоне значений (-100 ÷ +27) дБм, при дискретности установки уровня 0,01 дБ.

Такие высокие параметры обеспечиваются с помощью многочисленных алгоритмов калибровки мощности. Выкалибровываются частотные неравномерности различных участков СВЧ тракта, разбросы параметров применяемых элементов, температурные уходы активных элементов, применяется обратная связь по уровню СВЧ сигнала на выходе для работы цепей автоматической регулировки уровня.

Заключение

Таким образом, были решены задачи сверхширокополосного согласования и минимизации потерь в СВЧ тракте, обеспечены высокий уровень развязок на СВЧ, высокая чистота спектра выходного сигнала, прецизионность установки выходной мощности. Это позволило создать отечественный СВЧ генератор MBG100A с диапазоном частот 100 кГц ÷ 40 ГГц и высокими параметрами: выходная мощность - 120 ÷ 27 дБм, шаг регулировки мощности 0,01 дБ, шаг регулировки частоты 0,001 Гц, относительная нестабильность частоты $\pm 5 \cdot 10^{-8}$, уровень гармоник -80 дБ.

Список литературы

1. Патент № 2743070 Российская Федерация, МПК H01P 1/203 (2006.01), СПК H01P 1/203 (2021.01). Волновод с копланарно-волноводной согласующей линией передачи: № 2020116692: заявл. 24.04.2020 опубл. 15.02.2021 / Сафронов А. Н., Корнилов И. С.; заявитель ООО «Миг Трейдинг»
2. Патент № 2743007 Российская Федерация, МПК H01P 1/203 (2006.01), СПК H01P 1/203 (2020.08). Микрополосковый полосо-пропускающий фильтр и устройство, включающее микрополосковый полосо-пропускающий фильтр: № 2020116697: заявл. 24.04.2020: опубл. 12.02.2021 / Сафронов А. Н., Корнилов И. С.; заявитель ООО «Миг Трейдинг»