

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СВЧ СМЕСИТЕЛИ САНТИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Представлены применяемые методы расчета СВЧ смесителей. Показано, что наиболее предпочтительными методами являются: метод спектрального гармонического баланса и параметрический подход. Использование пакетов прикладных программ, реализованные по данным методам, позволило создать множество СВЧ смесителей как с низкой, так и с высокой промежуточной частотой в гибридно-интегральном и монолитном исполнении, работающие в сантиметровом диапазоне длин волн. Представлены электрические параметры и габаритные размеры спроектированных смесителей.

В настоящее время при анализе и расчете используется метод спектрального гармонического баланса [1], параметрический подход [2] и метод численного интегрирования [3]. Первые два метода находят решение в частотной области, а последний во временной. Разнообразие качественных показателей, характеристик и параметров смесителя обычно задаются в частотной области. Поэтому методы анализа нелинейных схем непосредственно в частотной области предпочтительнее метода анализа во временной. Кроме того, применение метода решения задачи по расчету смесителя во временной области с низким значением промежуточной частоты требует значительных затрат машинного времени. Он эффективен при исследовании переходных процессов, которые обычно не интересуют разработчиков и потребителей СВЧ смесителей. В связи с этим при проектировании смесителей мы применяем параметрический подход и метод спектрального гармонического баланса.

252148, Киев, пр. 50 лет Октября, 26,
НПО "Сатурн", тел. 477-67-39

При параметрическом подходе расчет качественных показателей обычно разбивается на два этапа: режим большого сигнала (нелинейный этап) и режим малого сигнала (линейный этап). В режиме большого сигнала допускаем, что напряжение гетеродина и смещения воздействуют на нелинейные функции смесительного диода. Нелинейные - проводимость (G_f) и емкость (C_f) смесительного диода описываются выражениями:

$$G_f = \alpha I_0 e^{\frac{\alpha U_r}{V}} \quad (1)$$

$$C_f = \frac{C_0}{\sqrt{1 - U_r/V}} \quad (2)$$

где α - параметр, характеризующий отклонение вольт-амперной характеристики от идеальной экспоненты, $1/V$; U_r - напряжение гетеродина, В; C_0 - барьерная емкость диода при нулевом смещении, Ф; V - высота барьера Шоттки, В; I_0 - ток насыщения диода, А. Решение задачи в режиме большого сигнала заключается в нахождении значений гармоник нелинейной проводимости и емкости согласно выражений (1), (2), которые передаются на линейный этап. Учет влияния элементов цепи гетеродина и паразитных параметров диода на амплитуды спектра гармоник проводимости и емкости возможно учесть решая задачу Коши численным методом Рунге-Кутты с последующим разложением временных функций проводимости и емкости в ряд Фурье.

На линейном этапе расчета смеситель представляется системой линейных алгебраических уравнений с комплексными переменными на множестве комбинационных частот:

$$\begin{cases} b_1 \\ b_n \end{cases} = \begin{cases} S_1 \\ S_n \end{cases} * \begin{cases} a_1 \\ a_n \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} b_1 \\ b_n \end{cases} = \begin{cases} S_1 \\ S_n \end{cases} * \begin{cases} a_1 \\ a_n \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} b_1 \\ b_n \end{cases} = \begin{cases} M \\ M \end{cases} * \begin{cases} a_1 \\ a_n \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \frac{1 + Y_f}{1 - Y_f} \quad (6)$$

$$w_{\tau} = w_c + w_{\tau} * m \quad (7)$$

где S_A - диагональная матрица линейных элементов (микрополосковые линии, неоднородности, шлейфы, сосредоточенные R, L, C - элементы); S_D - параметрическая матрица диода; M - топологическая матрица схемы; $b = \{b_1, b_m\}$; $a = \{a_1, a_m\}$ - множество падающих и отраженных волн линейных и параметрических элементов эквивалентной схемы смесителя; Y_d - общая матрица проводимости диода; w_{τ} - круговая комбинационная частота продуктов преобразования; w_c - круговая частота сигнала; w_{τ} - круговая частота сигнала гетеродина; m - целое число. На основе приведенных соотношений разработан комплекс программ расчета параметрических цепей, с помощью которого в 50-м тракте рассчитываются значения потерь преобразования КСВН по входу сигнала, гетеродина и выходу промежуточной частоты [4]. Время счета одного варианта на линейном этапе порядка 30 с на ЭВМ 1 ЕМ РС АТ 386.

Основной недостаток данного метода - требование, чтобы мощность гетеродина превышала мощность сигнала на несколько порядков. Это не позволяет анализировать схему с произвольными значениями мощностей сигнала и гетеродина, а также влияние помехи.

При нескольких воздействующих сигнала наибольшее применение находят методы Вольтерра-Винера [5] и построенные на идеях спектрального гармонического баланса [1]. Первые предпочтительнее применять при большом количестве входных (но малых по величине) сигналов и для устойчивых схем, вторые эффективнее при меньшем числе входных сигналов (два-три), так как число сигналов определяет порядок решаемой системы уравнений. Причем в методах спектрального гармонического баланса нет ограничений на величины сигнала, виды нелинейностей, устойчивость схем. Поэтому последний метод является наиболее оптимальным для расчета СВЧ смесителей. Для класса диодотранзисторных гибридно-интегральных и монолитных схем математическая модель при нескольких воздействующих сигналах представляет собой систему нелинейных алгебро-трансцендентных уравнений относительно комплексных переменных. Для ее решения после разбienia на вещественную и мнимую части можно использовать методы алгебраических уравнений типа метода Ньютона [6] или оптимизационные методы [7]. На основе найденных при решении спектральных составляющих амплитуд и фаз

узловых потенциалов, токов и напряжений на элементах схемы определяются необходимые качественные показатели: потери преобразования, входное сопротивление на заданных частотах, коэффициент отражения и КСВН, входную и выходную мощности и т. д. Причем следует отметить, что такие параметры как коэффициенты сжатия, перекрытия, взаимных нелинейных искажений определяется более точно указанным методом, чем через разложение вольт-амперных характеристик в ряд Тейлора или аппарат рядов Вольтерра.

Представленный метод реализован в виде пакета прикладных программ. Время счета одного варианта на ЭВМ типа IBM PC AT 386 порядка 5 мин. Применение этих пакетов прикладных программ позволило создать множество СВЧ смесителей с высокой и низкой промежуточной частотой. Смесители изготовлены по тонкопленочной технологии гибридно-интегральных схем. Ввод и вывод СВЧ-энергии осуществлены с помощью коаксиальных разъемов. Заземление выполнялось посеребрянной фольгой толщиной 20 мкм. Диоды припаивались припоем ПОСК-61.

Измерения потерь преобразования и КСВН смесителей производились на стандартном измерителе КСВН и ослабления. До начала измерений потерь преобразования определяется чувствительность широкополосного коаксиального детекторного модуля по СВЧ сигналу и по сигналу промежуточной частоты. Разница в чувствительности коаксиального детекторного модуля учитывалась при определении потерь преобразования.

Балансные смесители с низкой промежуточной частотой до 500 МГц в диапазоне частот 3 - 12 ГГц двух типов выполнены в литерном исполнении на поликоровой подложке размерами 12х15х0,5 мм и 6х10х0,5 мм. Потери преобразования не превышали 7,0 дБ при КСВН меньше 2. В представленных смесителях с целью уменьшения неравномерности потерь преобразования не более 0,5 дБ в диапазоне частот при измерении мощности гетеродина в интервале значений 5:35 дБ использовалась оптимальная линия нагрузки по постоянному току. Для ее реализации необходимо подать от источника постоянного напряжения смещения на смесительные диоды через простую резистивную цепочку. Исходными данными для расчета номинала резистора являются заданное значение напряжения от внешнего источника смещения, а также определенные величины тока и напряжения путем пересечения оптимальной линии нагрузки с осями тока и напряжения семейства вольт-амперных характеристик диодов.

Угол наклона этой линии находился путем проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Широкополосный смеситель, перекрывающий диапазон по сигналу 1,5 : 12 ГГц с промежуточной частотой до 70 МГц, реализован на сочетании различных типов линий передач (микрополоса-щель-компланар) имеет потери преобразования не более 8,5 дБ. Размер поликоровой подложки 15x24x0,5 мм.

Для приема спутникового телевидения создан в диапазоне 10,95 : 11,7 ГГц балансный смеситель на дешевом материале типа ФАФД толщиной 0,5 мм с размером подложки 20x15 мм, который имеет следующие параметры:

потери преобразования, не более, дБ	7,5
КСВН по входу и выходу, не более, дБ	20
развязка гетеродин-ПЧ, более, дБ	30
развязка гетеродин-сигнал, более, дБ	28
заграждение зеркального канала, более, дБ	27
эквивалентная шумовая температура ТШ 4000 К при ТШ ПУПЧ = 300 К	

Двухбалансные смесители разработаны в диапазоне частот 3:0 ГГц с полосой пропускания по сигналу 500 МГц. Двухуровневое расположение плат позволяет при замене квадратурного сумматора по выходу широко варьировать промежуточную частоту от нескольких мегагерц до 600 МГц. Потери преобразователя смесителя не более 7,5 дБ при заграждении зеркального канала не менее 25 дБ.

Разработаны также опытные образцы смесителей с относительно высокой промежуточной частотой, когда промежуточная частота в 2 - 3 раза меньше частоты сигнала. Так, например, смеситель с центральной частотой на 21 ГГц при полосе частот по сигналу 1 ГГц, а промежуточная частота при этом 7,5 ГГц имеет потери преобразования не более 7,5 дБ. Он выполнен на кварцевой подложке с размерами 20x8x0,5 мм.

Субгармонические смесители, работающие от второй гармоники гетеродина, как с низкой промежуточной частотой (частота сигнала 7 : 8 ГГц, а промежуточная до 500 МГц) так и с высокой промежуточной частотой порядка 4 ГГц в частотном диапазоне по сигналу 14:16 ГГц и 16:18 ГГц имеют потери преобразования соответственно 8 и 10 дБ. Смесители выполнены на поликоровых подложках 15x24x0,5 мм.

В монолитном исполнении балансный диодный смеситель

имеет размеры 2x2 мм, а потери преобразования не превышают 10 дБ. Диапазон рабочих частот по СВЧ сигналу 3, 4: 3, 9 при промежуточной частоте не более 350 МГц.

Разработанные пакеты прикладных программ решения нелинейных задач для расчета электрических параметров СВЧ смесителей позволили создать целую гамму разнотипных смесителей работающих в различных диапазонах частот от 1 до 23 ГГц. Учет нелинейных эффектов позволяет вычислять частотную неравномерность комплексного коэффициента передачи, коэффициенты блокирования, оценку уровней комбинационных составляющих, попадающих в полосу ПЧ, и др.

Список литературы

1. Хабицкий В. П., Шелковников Б. Н. Спектральный анализ нелинейных электронных схем при воздействии двух сигналов произвольной мощности // Автоматизация проектирования в электронике. - Киев, 1982. - Вып. 25. - С. 91-100.
2. Egan S. Nonlinear, Linear Analysis and Computer-Aided Design of Resistive Mixers, - IEEE Trans. - 1973. - MTT-22, N3. - P. 270-275.
3. Баквалов Н. С. Численные методы. - М: Наука, 1975. - 632 с.
4. Мушер И. В., Михайленко В. Г., Ломака В. Л. Пакет прикладных программ проектирования транзисторных усилителей // Всесоюз. научно-техн. конф. "Проблемы интегральной электроники СВЧ": Тез. докл. - Л., 1984. - 317 с.
5. Ильин В. Н., Хигалов И. Е., Ленцов В. Н. Методы автоматизированного схемотехнического проектирования нелинейных радиотехнических целей // Изв. вузов. Радиозлектроника - 1985. 28, №. - С. 7-17.
6. Чуа Л. О. Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем. - М.: Энергия, 1980. - 639 с.
7. Петренко А. И. Основы автоматизации проектирования - Киев: Техніка, 1982. - 295 с.