

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ И УСТРОЙСТВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 178-220 ГГц

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Боровская М.А.

Гусинский А.В. – к-т. техн. наук, доцент

Развитие средств точного позиционирования беспилотных автомобилей и летательных аппаратов, обследования и лечение организма человека, улучшение продуктивности сельскохозяйственных культур, повышение точности метеорологических и космических исследований вызвало бурное освоение более высокочастотных диапазонов электромагнитного излучения. Разработка, производство и эксплуатация сложных радиотехнических систем и комплексов, работающих в субмиллиметровом диапазоне длин волн, требуют соответствующего метрологического обеспечения, для осуществления которого требуется вся номенклатура приборов, начиная от генераторов и измерителей мощности и заканчивая скалярными и векторными анализаторами СВЧ-цепей.

К числу наиболее эффективных измерительных средств, предназначенных для инструментального анализа параметров СВЧ-устройств, относятся скалярные и векторные анализаторы СВЧ-цепей, представляющие современные высокопроизводительные информационно-измерительные системы. С их помощью можно провести измерения параметров, связывающих падающие на i -входы СВЧ-устройства волны a_i и отраженные (рассеянные) от них волны b_i , где $i = 1, 2, \dots, n$ (n -число пар полюсов эквивалентного СВЧ-устройству $2n$ -полюсника). Связь падающих и отраженных волн в общем случае может быть выражена в виде:

$$b_i(\omega) = \sum_{k=1}^n S_{ik}(\omega) a_k(\omega)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$, или в матричном виде

$$[b] = [S][a].$$

В общем случае параметры являются комплексными величинами, зависящими от частоты. Основными «цепными» параметрами СВЧ-устройства, подлежащими измерению, являются: модули $|S_{ii}|$ и фазы $\arg S_{ii}$ коэффициентов отражения, модули $|S_{ik}|$ и фазы $\arg S_{ik}$ коэффициентов передачи. А также производные от них параметры: коэффициент стоячей волны по напряжению -го плеча

$$K_i = \frac{1 + |S_{ii}|}{1 - |S_{ii}|},$$

вносимое ослабление между плечами $i - k$

$$A_{ik} = 20 \lg |S_{ki}|,$$

невзаимный фазовый сдвиг между плечами $i - k$

$$\alpha_{ik} = \arg S_{ki} - \arg S_{ik}.$$

Разработка и использование скалярных и векторных анализаторов цепей (ВАЦ) в субмиллиметровом диапазоне волн требуют учета факторов, специфических для этого диапазона волн и оказывающих существенное влияние на технические и метрологические характеристики таких ВАЦ. Во-первых, к таким факторам следует отнести большие потери энергии в линиях передачи. Как показывают результаты расчетов, для субмиллиметрового диапазона длин волн потери мощности в одномодовых металлических волноводах достигают 12 дБ/м при длине волны $\lambda = 1$ мм. Очевидно, что для компенсации этих потерь необходим источник испытательных сигналов с большим уровнем выходной мощности. Выпускаемые промышленностью ГКЧ обычно имеют средний уровень выходной мощности в пределах 5-10 мВт. При среднем значении ослабления в СВЧ-тракте (15-25 дБ) и необходимом пределе измерения ослабления 60-80 дБ этого уровня выходной мощности ГКЧ явно недостаточно. Для обеспечения требуемого предела измерения необходимо уменьшить ослабление, вносимое СВЧ-трактом анализатора цепей, что может быть осуществлено путем лучшего согласования составляющих элементов тракта и/или его существенного конструктивного упрощения.

Во-вторых, с уменьшением длины волны значительно возрастают фазовые погрешности измерений, обусловленные неповторяемостью устанавливаемого значения частоты при измерении и калибровке, а также от измерения к измерению и из-за нестабильности частоты. В общем случае удобнее назвать их «погрешностью из-за неопределенности значения частоты». Эта погрешность может иметь две составляющие: первую, связанную с неопределенностью электрической длины объекта измерения, и вторую, зависящую от частотной характеристики измеряемого параметра. Количественная оценка абсолютной погрешности измерения фазового сдвига показывает, что при относительной погрешности установки частот $\delta f = \pm 0,002$, характерной для большинства ГКЧ, при длине отрезков волновода 10 мм, значение этой погрешности на частоте 100 ГГц достигает $\Delta \varphi = \pm 3,0$ град. С увеличением длины отрезка волновода погрешность линейно возрастает.

Третья проблема связана с точностью изготовления каналов волноводных элементов измерительного тракта и калибровочных мер в процессе их производства. Проводимые исследования показывают, что фактические размеры каналов волноводов, как правило, превышают номинальные значения и такая «сверхразмерность» имеет тенденцию к увеличению с ростом частоты, особенно заметную на частотах выше 90 ГГц. Это может привести к значительным фазовым и амплитудным погрешностям в результатах измерений, если в память анализатора цепей вводится в качестве постоянной величины номинальная расчетная частота среза волновода, а не фактически измеренная, которая может на несколько гигагерц

отличаться от номинальной. Говоря о точности изготовления каналов волноводов в коротковолновой части миллиметрового диапазона ($\lambda \leq 2$ мм), необходимо отметить и важность соблюдения формы апертуры волновода, в частности, во фланцах, так как наличие деформаций, скруглений углов, других искажений контура и т.п. отрицательно сказывается на результатах измерений.

В-четвёртых, очень серьёзной проблемой, от решения которой во многом зависит достоверность результатов измерений на миллиметровых волнах, является проблема волноводных фланцевых соединений, проблема допусков на основные присоединительные размеры фланцев. Исследования влияния на качество согласования смещения и перекосов волноводов из-за допусков на присоединительные размеры фланцев показали, что допуски на размеры штифтов и штифтовых отверстий фланцев в диапазонах частот выше 100 ГГц должны быть обратны частоте:

$$(\text{допуск на частоте } f \text{ ГГц}) = (\text{допуск для волновода WR-10}) \times (100f)$$

В соответствии с данным соотношением на частоте 200 ГГц максимально допустимое смещение (перекос) фланца может быть 0,08 мм, что на практике трудновыполнимо при использовании традиционной технологии механической обработки фланцев.

Все это накладывает определенные условия и ограничения на выбор соответствующего метода измерения и конструкции ВАЦ, обеспечивающих высокие метрологические характеристики. Вследствие чего возникают трудности в практической реализации и разработке анализаторов цепей в диапазоне частот 178-220 ГГц. Проведенный патентный поиск, показал, что на данный момент в мире не существует ни скалярного ни векторного анализатора цепей, охватывающих диапазон частот 178-220 ГГц. Данную измерительную задачу можно решить с помощью частотных расширителей различных зарубежных фирм (Oleson Microwave Labs, Virginia Diodes Inc., Farran Microwave), перекрывающих диапазон частот до 1000 ГГц и совместимых с любым из продаваемых в настоящее время микроволновых ВАЦ.

На рисунках 1 и 2 приведены упрощенные блок-схемы частотных расширительных модулей V05VNA2-T/R и V05VNA2-T фирмы Oleson Microwave Labs:

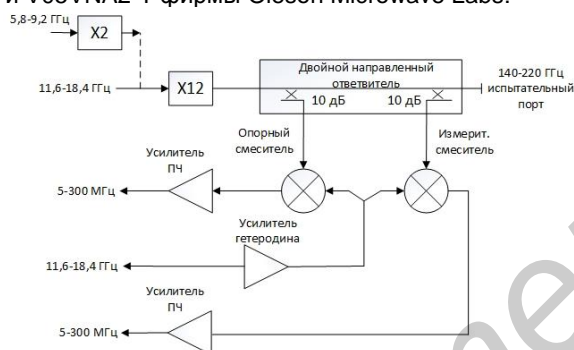


Рис. 1 – Упрощенная блок-схема V05VNA2-T/R

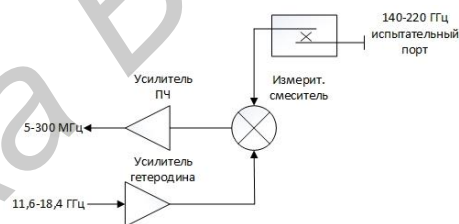


Рис. 2 – Упрощенная блок-схема V05VNA2-T

Модуль V05VNA2-T/R включает в себя умножитель на двенадцатой гармонике, который действует как системный источник РЧ-сигнала. Входная частота меняется от 11,6 до 18,4 ГГц. При использовании синтезаторов диапазона до 10 ГГц возможно применение недорогого добавочного удвоителя (x2) к умножительной цепочке. Измерительная секция V05VNA2-T/R содержит двойной направленный ответвитель, который обеспечивает получение прямого связанного сигнала (-10 дБ) для опорного понижающего преобразователя и обратного связанного сигнала (-10 дБ), поступающего к измерительному понижающему преобразователю. Ответвитель имеет направленность 35 дБ. Используемые смесители накачиваются субгармонически сигналом гетеродина частотой от 11,6 до 18,4 ГГц. Уровень этого сигнала поддерживается постоянным для каждого смесителя усилителем гетеродина с ограничением для обеспечения хороших характеристик в полной частотной полосе. Смесители представляют собой два диода в единой балансной конструкции с ПЧ в пределах между 5 и 300 МГц в зависимости от того, какая измерительная система ВАЦ используется. Коэффициент шума ПЧ составляет менее 1,7 дБ, а усиление ПЧ устанавливается в зависимости от используемой системы ВАЦ.

Модуль V05VNA2-T использует единственный понижающий преобразователь, идентичный с используемым в T/R-модуле. Дополнительно для уменьшения входных потерь на отражение T-модуля (для улучшения согласования нагрузки измерительной системы) применяется ответвитель типа аттенуатора с максимально плоской (равномерной) характеристикой переходного ослабления.

Таким образом, в связи с перечисленными особенностями проведения измерений в субмиллиметровом диапазоне волн разработка и изготовление скалярного и векторного анализатора цепей в диапазоне 178-220 ГГц является трудноосуществимой задачей, которая на данный момент не реализована. Для инструментального анализа параметров СВЧ-устройств предлагается использовать частотные расширители, перекрывающие рассматриваемый диапазон частот и имеющие высокие метрологические характеристики.

Список использованных источников:

1. Гусинский, А.В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн: монография. В 3 ч. Ч.3 (кн.2). Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей / А.В. Гусинский, Г.А. Шаров, А.М. Кострикин. – Минск: БГУИР, 2008. – с.241-507.
2. ГОСТ 13317-89. Элементы соединения СВЧ трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры.