

УДК 621.317

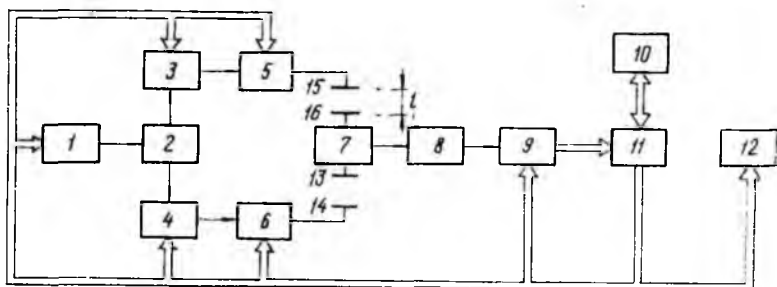
А. Ф. АНЖИЕВСКИЙ, И. Л. ВЕТРОВ, канд. техн. наук,
Н. А. ГРУДИНА, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Вопросы автоматизации СВЧ-измерений, в частности построения автоматизированных измерительных систем (АИС), изучены недостаточно. Попытки решить эту проблему объединением набора стандартных приборов в агрегатированную систему, управляемую ЭВМ, не дают желаемых результатов. Для создания АИС необходимо иметь

первичные преобразователи, образцовые меры, коммутирующие устройства, ЭВМ и программное обеспечение. При реализации АИС в миллиметровом диапазоне возникает ряд дополнительных трудностей: низкое качество первичных преобразователей; необходимость учета при исследовании ФЧХ четырехполюсников ФЧХ отрезков волновода, относительно которых производятся измерения или калибровка систем и т. д.

Рассмотрим особенности построения АИС на основе коммутационного метода, как наиболее сочетающегося с вычислительной техникой при комплексных измерениях и имеющего простой СВЧ-тракт. Суть метода состоит в том, что в двухканальном измерительном тракте производится амплитудно-фазовая коммутация СВЧ-сигналов, поступа-



ющих на один СВЧ-детектор. Обработка выходных напряжений СВЧ-детектора позволяет получить необходимую информацию об амплитудных и фазовых характеристиках исследуемого объекта.

На рисунке представлена структурная схема АИС, которая содержит генератор СВЧ 1, делитель мощности 2, управляемые ключи 3, 4, управляемые фазовращатели 5, 6, сумматор 7, квадратичный детектор 8, аналого-цифровой преобразователь 9, ЭВМ 10, блок сопряжения 11, индикатор цифровой и графической информации 12, входные фланцы 13, 14, 15, 16.

Исследуемый четырехполюсник, имеющий модуль T и фазу α коэффициента передачи, включается в измерительный канал СВЧ-тракта между фланцами 13, 14. В опорный канал устанавливается отрезок регулярного волновода длиной l , предназначенный для выравнивания геометрических длин каналов.

Формирование на выходе детектора измерительных сигналов $u_1 \div u_4$ производится в четыре такта коммутацией СВЧ-ключей 3, 4 и подачей управляющего сигнала на фазовращатель 5, управляющий сигнал на фазовращатель 6 не поступает.

При этом на выходе квадратичного детектора образуются напряжения $u_1 = qE^2K_1^2$, если открыт ключ 3; $u_2 = qE^2K_2^2T^2$, если открыт ключ 4; $u_3 = qE^2[K_1^2 + K_2^2T^2 + 2K_1K_2T \cos(\varphi + \alpha - \Psi)]$, если открыты оба ключа; $u_4 = qE^2[K_3^2 + K_2^2T^3 + 2K_3K_2T \cos(\varphi + \alpha - \Psi + \beta)]$, если открыты оба ключа, на фазовращатель 5 подан управляющий сигнал, где q — чувствительность детектора; E — амплитуда

СВЧ-сигнала на выходе аттенюатора 2; φ — разность фаз коэффициентов передачи опорного и измерительного каналов, вызванная разностью их длин при отсутствии управляющих сигналов на фазовращателях; β — изменение фазы коэффициента передачи опорного канала при подаче управляющего сигнала на фазовращатель 6; K_1, K_2 — модули коэффициентов передачи опорного и измерительного каналов при отсутствии управляющих сигналов на фазовращателях; K_3 — модуль коэффициента передачи опорного канала при наличии управляющего сигнала на фазовращателе 6; Ψ — набег фазы СВЧ-сигнала в отрезке l регулярного волновода.

Сформированные напряжения $u_1 + u_4$ преобразуются АЦП в цифровые эквиваленты и вводятся через блок сопряжения в ЭВМ для обработки

$$T = L_2 \sqrt{u_2/u_1}; \quad A = \cos(\varphi + \alpha - \Psi) = (u_3 - u_2 - u_1)/2 \sqrt{u_2 u_1} \quad (1);$$

$$B = \cos(\varphi + \alpha - \Psi + \beta) = (u_4 - u_2 - u_1 L_1^2)/2 L_1 \sqrt{u_1 u_2} \quad (2).$$

Здесь L_1 — относительное изменение модуля коэффициента передачи опорного канала при введении в него фазового сдвига β , $L_1 = K_3/K_2$; L_2 — отношение модулей коэффициентов передачи опорного и измерительного каналов без четырехполосника, $L_2 = K_1/K_2$.

Полагая значение β известным, находим

$$\sin(\varphi + \alpha - \Psi) = \frac{A \cos \beta - B}{\sin \beta}, \quad \beta \neq n\pi; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Используя известное тригонометрическое соотношение для тангенса половинного аргумента, определяем измеренное значение фазы коэффициента передачи четырехполосника

$$\alpha = 2 \arctg \frac{A \cos \beta - B}{(1 + A) \sin \beta} - \varphi + \Psi + 2\pi m; \quad \Psi = 2\pi l \lambda, \quad (3)$$

где λ — длина волны в отрезке регулярного волновода.

Таким образом, модуль и фаза коэффициента передачи исследуемого четырехполосника могут быть рассчитаны по выходным напряжениям детектора, если известны значения L_1, L_2, φ, β , характеризующие параметры измерительного СВЧ-тракта АИС. При этом измеренное значение фазы однозначно определено на интервале от $-\pi$ до π .

Выражение (3) справедливо для любых значений β , отличных от $n\pi$. Однако целесообразно обеспечивать значение β таким, чтобы погрешность его определения по возможности меньше влияла на точность измерения α . В качестве критерия оценки влияния используем коэффициент чувствительности S .

Дифференцируя выражение (3), находим

$$S = \left| \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \right| = \left| \frac{1}{\sin^2 \beta} (B \cos \beta - A) \right|.$$

Следовательно, минимальная чувствительность α к погрешности определения β имеет место при $\beta = \pi/2$.

Основной задачей калибровки АИС является экспериментальное определение значений L_1 , L_2 , φ , β , имеющих место в реальном СВЧ-тракте, и занесение их в память ЭВМ для использования в режиме модулей и фаз коэффициентов передачи исследуемых четырехполюсников.

Указанные значения определим по выходным напряжениям детектора $U_1 \div U_8$ в процессе калибровки, проводимой за восемь тактов при непосредственной стыковке фланцев 14 и 15, 16 и 17.

Состояние СВЧ-ключей и фазовращателей в первых четырех тактах соответствует аналогичным тактам режима измерения. Учитывая, что при стыковке фланцев $T = 1$, $\alpha = \Psi = 0$, опишем выходные напряжения детектора

$$U_1 = qE^2 K_1^2; U_2 = qE^2 K_2^2; U_3 = qE^2 [K_1^2 + K_2^2 + 2K_1 K_2 \cos \varphi]; \\ U_4 = qE^2 [K_3^2 + K_4^2 + 2K_3 K_4 \cos(\varphi + \beta)].$$

Выходные напряжения детектора в 5 — 8 тактах калибровки следующие: $U_5 = qE^2 K_3^2$, если открыт ключ 3, подан управляющий сигнал на фазовращатель 5; $U_6 = qE^2 K_4^2$, если открыт ключ 4, подан управляющий сигнал на фазовращатель 6; $U_7 = qE^2 [K_1^2 + K_4^2 + 2K_1 K_4 \cos(\varphi + \gamma)]$, если открыты оба ключа, подан управляющий сигнал на фазовращатель 6; $U_8 = qE^2 [K_3^2 + K_4^2 + 2K_3 K_4 \cos(\varphi + \gamma + \beta)]$, если открыты оба ключа, поданы управляющие сигналы на фазовращатели, где K_4 — модуль коэффициента передачи, а γ — изменение фазы коэффициента передачи измерительно канала при подаче управляющего сигнала на фазовращатель 6.

Обработка в ЭВМ сформированных напряжений $U_1 \div U_8$ позволяет определить значение косинусов фазовых сдвигов

$$C = \cos \varphi = (U_3 + U_2 - U_1) / 2\sqrt{U_1 U_2}; D = \cos(\varphi + \beta) = (U_4 - U_2 - U_5) / 2\sqrt{U_2 U_5}; F = \cos(\varphi + \gamma) = (U_7 - U_6 - U_1) / 2\sqrt{U_6 U_1}; \\ H = \cos(\varphi + \gamma + \beta) = (U_8 - U_6 - U_5) / 2\sqrt{U_5 U_6}.$$

Вспомогательный фазовый сдвиг γ , вводимый в измерительный канал при калибровке, компенсирует разность электрических длин каналов φ в целях однозначного определения фазового сдвига β . Для этого значения сигналов, управляющих фазовращателями, подбирают в процессе настройки АИС такими, чтобы фазовые сдвиги $\varphi + \gamma$ и $\varphi + \gamma + \beta$ ($\beta \approx \pi/2$) располагались в первом и втором квадрантах. Используя данное условие, получаем $\beta = \arccos H - \arccos F$.

По аналогии с выражением (3) определяем разность фаз коэффициентов передачи опорного и измерительного каналов СВЧ-тракта

$$\varphi = 2 \arctg \frac{C \cos \beta - D}{(1 + C) \sin \beta}.$$

Очевидно, что $\beta \approx \pi/2$ и в данном случае обеспечит минимальную погрешность определения φ .

По выходным напряжениям детектора находим $L_1 = \sqrt{U_5/U_1}$; $L_2 = \sqrt{U_1/U_2}$.

Таким образом, в ходе калибровки определены все необходимые параметры СВЧ-тракта АИС, используемые для измерения модуля и фазы коэффициента передачи исследуемого четырехполюсника.

Калибровку осуществляют в диапазоне рабочих частот АИС, накапливая в памяти ЭВМ массивы значений L_1 , L_2 , φ , β . Это позволяет производить измерения в широкой полосе частот, выбирая у массивов значения, относящиеся к частоте измерения.

Необходимо отметить некоторые особенности такого метода измерения, благоприятные для его реализации в миллиметровом диапазоне волн.

Как известно, большие разбросы частотных зависимостей чувствительностей детекторов миллиметрового диапазона волн, затрудняют реализацию многодетекторных методов измерения. Коммутация СВЧ-сигналов на один детектор позволяет преодолеть указанный недостаток. Данное свойство, присущее большинству коммутационных методов измерений, сохраняется и здесь.

Калибровка рассмотренной АИС учитывает коэффициенты передачи опорного и измерительного каналов и их изменение при введении фазовых сдвигов β , γ . Это допускает использование в тракте СВЧ простых фазовращателей сравнительно низкого качества с существенной паразитной амплитудой сигналов при изменении фазы.

Описанный метод измерения позволяет однозначно измерять фазу коэффициента передачи в диапазоне 2π . При этом отличие значения β от $\pi/2$ увеличивает чувствительность точности измерения к погрешности определения β , но не нарушает работоспособности метода.

В миллиметровом диапазоне волн даже малая разность длин каналов может привести к большим погрешностям измерения фазы коэффициента передачи. Поэтому положительной стороной метода является также учет технологического разброса длин каналов при измерениях разности фаз φ .

В соответствии с рассмотренным методом измерения создан экспериментальный образец АИС на базе ЭВМ «Электроника ДЗ-28» и волноводного тракта СВЧ с размером сечения $7,2 \times 3,4$ мм. В качестве сумматора и делителя мощности применены направленные ответвители с переходным ослаблением порядка 10 дБ. СВЧ-ключи, состоящие из двух последовательно включенных промышленных $p-i-n$ -диодных аттенуаторов, имеют ослабление в закрытом состоянии не менее 50 дБ; фазовращатели — ферритовые. Двенадцатиразрядный АЦП построен на принципе двойного интегрирования.

Результаты измерения и калибровки выводятся в виде графиков частотных зависимостей и цифр на экран электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), входящей в индикатор цифровой и графической информации.

Конструктивно АИС состоит из пяти блоков: ЭВМ, генератора Г4-141, блока измерений, блока СВЧ, блока индикатора.

Блок измерений включает в себя весь СВЧ-тракт, за исключением сумматора и детектора, а также АЦП и устройства управления ключами и фазовращателями. В блоке СВЧ расположены сумматор и предварительный усилитель сигналов детектора. Блок индикатора, кроме

индикатора цифровой и графической информации, содержит в себе блок сопряжения АИС с ЭВМ «Электроника ДЗ-28.

Испытания образца АИС показали, что погрешность измерения ослаблений A_x четырехполюсников не превышает $0,01 + 0,008 A_x$ в диапазоне ослаблений $0 + 20$ дБ и $0,5$ дБ — в диапазоне $0 + 30$ дБ. При этом погрешность измерения фазы не более 6° . При измерениях фаз коэффициентов передачи четырехполюсников, ослабления которых не более $5 + 7$ дБ, погрешность измерения порядка 3° . Из анализа экспериментов следует, что существенный рост погрешности измерения фазы не наблюдается, если значение β находится в пределах $90^\circ \pm 40^\circ$.

Программное обеспечение созданной АИС предусматривает возможность алгоритмического исключения разрывов ФЧХ, выходящих в диапазоне рабочих частот за пределы 360° . Изменение ФЧХ может достигать $\pm 800^\circ$ при погрешности индикатора $0,1^\circ$ либо $\pm 8000^\circ$ при погрешности индикатора 1° . Предусмотрена также возможность индикации нелинейности ФЧХ, определяемой по результатам измерений фазы в полосе частот.

Индикация результатов измерений производится на экране ЭЛТ в виде графиков частотных зависимостей параметров и двух групп цифр, отражающих частоту и значение параметра в точке графика, отмеченной маркером. Одновременно на экране можно наблюдать до трех различных графиков, имеющих единую ось частот.

Таким образом, при использовании данного метода измерения не требуется создания сложных СВЧ-трактов. Ключевой характер работы элементов измерительного тракта создает благоприятные перспективы для использования метода в качестве основы построения АИС более коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Поступила в редколлегию 30.03.87