

Анализ метода измерения S-параметров транзисторов СВЧ

Ю. В. РЯСНЫЙ, М. С. ЧАШКОВ, А. В. БОРИСОВ

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия, e-mail: aspirant-208@rambler.ru

Рассмотрен метод измерения S-параметров транзисторов СВЧ двойным 12-полюсным рефлектометром, состоящий из трех этапов. На каждом этапе формируются системы измерительных и калибровочных уравнений. Предложен метод калибровки рефлектометра, получены выражения для определения отношений волн напряжений генератора, входящих в систему уравнений.

Ключевые слова: коэффициент отражения, 12-полюсный рефлектометр, измерение, калибровка, транзистор СВЧ.

The three stage method of S-parameters measurement of microwave transistors by double 12-pole reflectometer is considered. At each stage the systems of measuring and calibration equations are formed. The reflectometer calibration method is offered, the expressions for determination of relationships of generator waves from the system of equations are received.

Key words: reflection coefficient, 12-pole reflectometer, measurement, calibration, microwave transistor.

Измерению S-параметров транзисторов СВЧ всегда уделяется большое внимание, поскольку на них основаны методы проектирования усилителей СВЧ. Например, в [1] рассмотрен метод, в котором измеряются падающие и отраженные от транзистора волны напряжений при изменении разности фаз между падающими волнами и S-параметры определяются как центры замкнутых контуров. В [2] дан анализ метода измерения S-параметров транзистора в режиме большого сигнала на основной гармонике. Недостатки этих методов связаны с тем, что процесс измерения требует длительного времени и измеренные S-параметры имеют низкую точность. При построении четырех замкнутых контуров первый из указанных недостатков обусловлен необходимостью большого массива измеренных отношений падающих и отраженных волн при изменении фаз между падающими волнами. Второй недостаток вызван тем, что измеряются S-параметры устройства, содержащего собственно транзистор и его держатель, а не S-параметры транзистора. Ниже рассмотрен метод измерения, позволяющий уменьшить продолжительность процесса измерения и определить S-параметры транзистора непосредственно в плоскости его входных и выходных зажимов.

Процесс измерения состоит из трех этапов [3]. На первом этапе измеряются комплексные коэффициенты отражения на входе и выходе устройства, содержащего держатель транзистора (коаксиально-полосковые переходы и прижимные контакты) и собственно транзистор СВЧ, при этом формируется система уравнений для определения S-параметров устройства. На втором этапе измеряются комплексные коэффициенты отражения коаксиально-полосковых переходов, при этом формируется система уравнений для определения S-параметров этих переходов. На третьем этапе измеряется отношение падающих волн напряжений генератора и комплексные коэффициенты отражения выходов 12-полюсных рефлектометров. После проведения измерений вычисляются S-параметры транзистора СВЧ.

На первом этапе создается линейный режим работы транзистора, при этом мощность сигнала генератора $a_{Г1}$ регулируется переменным аттенуатором 6 (см. рисунок) и контролируется измерителем мощности 11. Фаза сигнала генератора $a_{Г1}$ устанавливается переменным фазовращателем в начальное положение φ_0 . Мощность сигнала генератора $a_{Г2}$, которая регулируется переменным аттенуатором 9 и контролируется измерителем мощности 12, также соответствует линейному режиму работы транзистора. Комплексные коэффициенты отражения измеряются 12-полюсными рефлектометрами 15, 16 [4]. Затем фаза сигнала генератора $a_{Г1}$ изменяется переменным фазовращателем 2 до значения φ_1 и 12-полюсными рефлектометрами 15, 16 снова измеряются комплексные коэффициенты отражения.

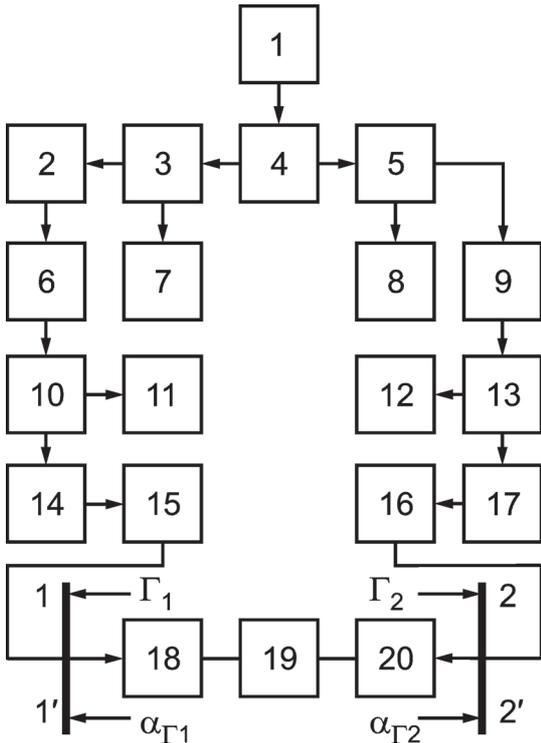
После этого мощность сигнала генератора $a_{Г2}$ переменным аттенуатором 9 устанавливается равной нулю и 12-полюсным рефлектометром 16 измеряется комплексный коэффициент отражения. На основе проведенных измерений формируется система уравнений для определения S-параметров устройства, содержащего держатель транзистора (коаксиально-полосковые переходы и прижимные контакты) и собственно транзистор СВЧ:

$$\Gamma_{вх1}(\varphi_0) = \frac{S_{11} - (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})\Gamma_2 + S_{12}a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_0)}{1 - S_{22}\Gamma_2 + S_{12}\Gamma_1 a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_0)};$$

$$\Gamma_{вх1}(\varphi_1) = \frac{S_{11} - (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})\Gamma_2 + S_{12}a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_1)}{1 - S_{22}\Gamma_2 + S_{12}\Gamma_1 a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_1)};$$

$$\Gamma_{вх2}(\varphi_0) = \frac{S_{22} - (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})\Gamma_1 + S_{21}a_{Г1}(\varphi_0)/a_{Г2}}{1 - S_{11}\Gamma_1 + S_{21}\Gamma_2 a_{Г1}(\varphi_0)/a_{Г2}};$$

$$\Gamma_{вх2}(\varphi_1) = \frac{S_{22} - (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})\Gamma_1 + S_{21}a_{Г1}(\varphi_1)/a_{Г2}}{1 - S_{11}\Gamma_1 + S_{21}\Gamma_2 a_{Г1}(\varphi_1)/a_{Г2}};$$



Структурная схема измерителя S-параметров:

1 — генератор СВЧ; 2 — переменный фазовращатель; 3, 5 — циркуляторы; 4 — делитель мощности; 6, 9 — переменные аттенюаторы; 7, 8 — согласованные нагрузки; 10, 13 — направленные ответвители; 11, 12 — измерители мощности; 14, 17 — вентили; 15, 16 — 12-полюсные рефлектометры; 18, 20 — коаксиально-полосковые переходы держателя транзистора; 19 — транзистор СВЧ; $a_{Г1}$, $a_{Г2}$ — падающие волны напряжения, поступающие от генератора сигнала на входы 12-полюсных рефлектометров; Γ_1 , Γ_2 — коэффициенты отражения от выходов рефлектометров

$$\Gamma_{вх1} = [S_{11} - (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})\Gamma_2] / (1 - S_{22}\Gamma_2),$$

где $\Gamma_{вх1}(\varphi_0)$, $\Gamma_{вх1}(\varphi_1)$, $\Gamma_{вх2}(\varphi_0)$, $\Gamma_{вх2}(\varphi_1)$ — измеренные комплексные коэффициенты отражения в сечениях 1—1' и 2—2' (см. рисунок) для различных фаз сигнала $a_{Г1}$; $\Gamma_{вх}$ — измеренный комплексный коэффициент отражения в сечении 1—1' при наличии сигнала $a_{Г1}$ и отсутствии сигнала $a_{Г2}$; S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} — S-параметры устройства, содержащего держатель транзистора (коаксиально-полосковые переходы и прижимные контакты) и собственно транзистор СВЧ; Γ_1 , Γ_2 — комплексные коэффициенты отражения от выходов 12-полюсных рефлектометров; $a_{Г1}/a_{Г2}$, $a_{Г2}/a_{Г1}$ — отношение сигналов напряжений, падающих на вход и выход устройства, содержащего держатель транзистора и собственно транзистор СВЧ.

На втором этапе транзистор удаляется из схемы, на выходах коаксиально-полосковых переходов держателя транзистора создаются поочередно режимы холостого хода и короткого замыкания и 12-полюсными рефлектометрами измеряются комплексные коэффициенты отражения, при этом формируется система уравнений для определения S-параметров коаксиально-полосковых переходов

$$\Gamma_{вх1}^{xx} = S_{11п1} + S_{12п1}S_{21п1} / (1 - S_{22п1}); \quad (1)$$

$$\Gamma_{вх1}^{кз} = S_{11п1} - S_{12п1}S_{21п1} / (1 + S_{22п1}); \quad (2)$$

$$\Gamma_{вх2}^{xx} = S_{11п2} + S_{12п2}S_{21п2} / (1 - S_{22п2}); \quad (3)$$

$$\Gamma_{вх2}^{кз} = S_{11п2} - S_{12п2}S_{21п2} / (1 + S_{22п2}), \quad (4)$$

где $\Gamma_{вх1}^{xx}$, $\Gamma_{вх2}^{xx}$, $\Gamma_{вх1}^{кз}$, $\Gamma_{вх2}^{кз}$ — измеренные комплексные коэффициенты отражения в сечениях 1—1' и 2—2' для режимов холостого хода и короткого замыкания на выходе коаксиально-полосковых переходов; $S_{11п1}$, $S_{22п1}$, $S_{12п1}$, $S_{21п1}$, $S_{11п2}$, $S_{22п2}$, $S_{12п2}$, $S_{21п2}$ — S-параметры коаксиально-полосковых переходов.

Из (1)—(4) определяются указанные S-параметры при условии, что матрицы коаксиально-полосковых переходов унитарны:

$$S_{11п1} = |S_{11п1}| e^{j\varphi_{s11}}; \quad S_{22п1} = |S_{22п1}| e^{j(2\varphi_{s12} - \varphi_{s11} - \pi)},$$

$$S_{12п1}S_{21п1} = |S_{11п1}|^2 e^{j2\varphi_{s12}}; \quad S_{11п2} = |S_{11п2}| e^{j\varphi_{s11}};$$

$$S_{22п2} = |S_{22п2}| e^{j(2\varphi_{s12} - \varphi_{s11} - \pi)}; \quad S_{12п2}S_{21п2} = |S_{11п2}|^2 e^{j2\varphi_{s12}}.$$

На третьем этапе из схемы удаляется устройство, содержащее держатель транзистора и собственно транзистор СВЧ, выходы 12-полюсных рефлектометров соединяются непосредственно и измеряются комплексные коэффициенты отражения при различных фазах φ_0 и φ_1 сигнала генератора $a_{Г1}$ и наличии сигнала генератора $a_{Г2}$. Затем поочередно измеряются комплексные коэффициенты отражения при наличии сигнала $a_{Г1}$ и отсутствии сигнала $a_{Г2}$ и, наоборот, при наличии сигнала $a_{Г2}$ и отсутствии сигнала $a_{Г1}$. На основе проведенных измерений формируется система уравнений для определения отношения падающих волн $a_{Г2}/a_{Г1}$ и коэффициентов отражений выходов 12-полюсных рефлектометров:

$$\Gamma_{изм1}(\varphi_0) = \frac{\Gamma_2 + a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_0)}{1 + \Gamma_1 a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_0)}; \quad (5)$$

$$\Gamma_{изм1}(\varphi_1) = \frac{\Gamma_2 + a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_1)}{1 + \Gamma_1 a_{Г2}/a_{Г1}(\varphi_1)}; \quad (6)$$

$$\Gamma_{изм1} = \Gamma_1; \quad (7)$$

$$\Gamma_{изм2} = \Gamma_2. \quad (8)$$

Из системы уравнений (5)—(8) находим отношения падающих волн напряжений:

$$\frac{a_{Г2}}{a_{Г1}(\varphi_0)} = \frac{\Gamma_{изм1}(\varphi_0) - \Gamma_2}{1 - \Gamma_1 \Gamma_{изм1}(\varphi_0)}; \quad \frac{a_{Г2}}{a_{Г1}(\varphi_1)} = \frac{\Gamma_{изм1}(\varphi_1) - \Gamma_2}{1 - \Gamma_1 \Gamma_{изм1}(\varphi_1)}.$$

Для определения S -параметров четырехполюсников уравнения (5)—(8) преобразуем к виду

$$S_{11}(1 - S_{22}\Gamma_2) + S_{12} \left(S_{21}\Gamma_2 - \Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0)\Gamma_1 \frac{a_{\Gamma 2}}{a_{\Gamma 1}(\varphi_0)} + \frac{a_{\Gamma 2}}{a_{\Gamma 1}(\varphi_0)} \right) + S_{22}\Gamma_2\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0) = \Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0); \quad (9)$$

$$S_{11}(1 - S_{22}\Gamma_2) + S_{12} \left(S_{21}\Gamma_2 - \Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1)\Gamma_1 \frac{a_{\Gamma 2}}{a_{\Gamma 1}(\varphi_1)} + \frac{a_{\Gamma 2}}{a_{\Gamma 1}(\varphi_1)} \right) + S_{22}\Gamma_2\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1) = \Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1); \quad (10)$$

$$S_{22}(1 - S_{11}\Gamma_1) + S_{21} \left(S_{12}\Gamma_1 - \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_0)\Gamma_1 \frac{a_{\Gamma 1}(\varphi_0)}{a_{\Gamma 2}} + \frac{a_{\Gamma 1}(\varphi_0)}{a_{\Gamma 2}} \right) + S_{11}\Gamma_1\Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_0) = \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_0); \quad (11)$$

$$S_{22}(1 - S_{11}\Gamma_1) + S_{21} \left(S_{12}\Gamma_1 - \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_1)\Gamma_1 \frac{a_{\Gamma 1}(\varphi_1)}{a_{\Gamma 2}} + \frac{a_{\Gamma 1}(\varphi_1)}{a_{\Gamma 2}} \right) + S_{11}\Gamma_1\Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_1) = \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_1); \quad (12)$$

$$S_{11}(1 - S_{22}\Gamma_2) + S_{12}S_{21}\Gamma_2 + S_{22}\Gamma_2\Gamma_{\text{вх}1} = \Gamma_{\text{вх}1}. \quad (13)$$

Вычтем (13) из (9) и (10), получим систему уравнений для определения параметров S_{12} и S_{22} , решив которую, найдем

$$S_{12} = (Q_1 - Q)/(G_1 - G); \quad S_{22} = (QG_1 - Q_1G)/(G_1 - G),$$

где $Q = \frac{\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0) - \Gamma_{\text{вх}1}}{(1 - \Gamma_{\text{вх}1}\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0))a_{\Gamma 2}/a_{\Gamma 1}(\varphi_0)};$

$$Q_1 = \frac{\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1) - \Gamma_{\text{вх}1}}{(1 - \Gamma_{\text{вх}1}\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1))a_{\Gamma 2}/a_{\Gamma 1}(\varphi_1)};$$

$$G = \frac{(\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0) - \Gamma_{\text{вх}1})\Gamma_2}{(1 - \Gamma_{\text{вх}1}\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_0))a_{\Gamma 2}/a_{\Gamma 1}(\varphi_0)};$$

$$G_1 = \frac{(\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1) - \Gamma_{\text{вх}1})\Gamma_2}{(1 - \Gamma_{\text{вх}1}\Gamma_{\text{вх}1}(\varphi_1))a_{\Gamma 2}/a_{\Gamma 1}(\varphi_1)}.$$

Из (11) и (12), зная параметры S_{12} и S_{22} , получаем

$$S_{11} = (AB_1 - A_1B)/(CB_1 - C_1B); \quad S_{21} = (AC_1 - A_1C)/(CB_1 - C_1B),$$

где $A = \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_0)\Gamma_1 - S_{22}\Gamma_1; \quad A_1 = \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_1)\Gamma_1 - S_{22}\Gamma_1;$

$$B = S_{12}\Gamma_1 - \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_0)\Gamma_1 a_{\Gamma 1}(\varphi_0)/a_{\Gamma 2} + a_{\Gamma 1}(\varphi_0)/a_{\Gamma 2};$$

$$B_1 = S_{12}\Gamma_1 - \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_1)\Gamma_1 a_{\Gamma 1}(\varphi_1)/a_{\Gamma 2} + a_{\Gamma 1}(\varphi_1)/a_{\Gamma 2};$$

$$C = \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_0); \quad C_1 = \Gamma_{\text{вх}2}(\varphi_1).$$

По полученным S -параметрам определяем T -параметры устройства, содержащего держатель транзистора и собственно транзистор СВЧ, и T -параметры коаксиально-полосковых переходов (T_1, T_2), а затем T -параметры транзистора (T_T) из уравнения

$$\begin{bmatrix} T_{11T} & T_{12T} \\ T_{21T} & T_{22T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11n1} & T_{12n1} \\ T_{21n1} & T_{22n1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11n2} & T_{12n2} \\ T_{21n2} & T_{22n2} \end{bmatrix}^{-1}.$$

Зная T -параметры транзистора, определяем его S -параметры

$$S_{11T} = T_{21T}/T_{11T}; \quad S_{12T} = (T_{11T}T_{22T} - T_{12T}T_{21T})/T_{11T};$$

$$S_{21T} = 1/T_{11T}; \quad S_{22T} = -T_{12T}/T_{11T}.$$

Таким образом, точность измерения S -параметров транзисторов обусловлена многими источниками погрешностей, доминирующие из них — непостоянство параметров соединителей при неоднократных подключениях объектов измерений и устройства калибровки. Результаты машинного моделирования метода измерения показали, что погрешность измерения фазы не превышает $\pm 5^\circ$, а погрешность измерения модуля — не более $\pm 0,02$.

Литература

1. **Mazumder S. R., Van der Pulie P. D.** Two-Signal Method of Measuring the Large-Signal S -Parameter of Transistors // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1978. V. MTT-26. N 6. P. 417—420.
2. **Торопов Е. Б.** Измерение S -параметров транзистора в режиме большого сигнала // Радиотехника. 1981. Т. 36. № 10. С. 63—65.
3. **Пат. 2361227 РФ.** Способ измерения S -параметров транзисторов СВЧ в линейном режиме / В. А. Севрюков, И. В. Безсудов, Ю. Г. Тацкий // Изобретения. 1996. № 15.
4. **Петров В. П. и др.** Анализ методов калибровки 12-полюсного рефлектометра // Измерительная техника. 1985. № 10. С. 40—41; **Petrov V. P. e. a.** Analysis of methods of 12-pole reflectometer calibration // Measurement Techniques. 1985. V. 28. N 10. P. 878—881.

Дата принятия 04.05.2012 г.