

ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ

УДК 621.317.742:621.372.812

АНАЛИЗ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ ЦЕПЕЙ 12-ПОЛЮСНЫМ РЕФЛЕКТОМЕТРОМ

Ю. В. Рясный, профессор СибГУТИ, д. т. н.

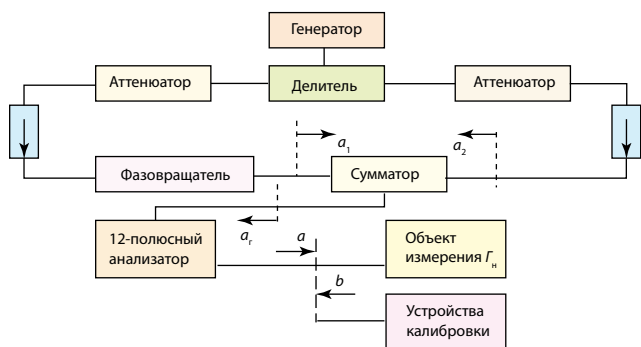
М. С. Чашков, аспирант СибГУТИ; Michael-Fare@mail.ru

Ключевые слова: коэффициент отражения, уравнения калибровки, измерительные уравнения, диодные преобразователи, генераторы сигналов, калибратор фазы.

Одним из основных источников погрешности измерения комплексных коэффициентов отражения 12-полюсным рефлектометром является неквадратичность диодных преобразователей (ДП), которые преобразуют комплексный сигнал СВЧ в скалярную величину, пропорциональную модулю выходящей волны напряжения. В [1] описывается метод уменьшения влияния неквадратичности диодов за счет нормирования измерительных сигналов к сигналу падающей волны напряжения. Однако точность исключения влияния неквадратичности характеристики в этом случае недостаточна для прецизионных измерений параметров из-за неидеальности направленного ответвителя и погрешности измерителя мощности падающей волны напряжения.

В статье рассмотрен метод повышения точности измерения коэффициентов отражения за счет нормирования сигналов на выходе ДП при подключенном объекте измерения к сигналам на выходе ДП при согласованной нагрузке.

Метод повышения точности измерения комплексного коэффициента отражения за счет исключения влияния неквадратичности характеристик ДП 12-полюсного рефлектометра рассмотрим на основе функциональной схемы измерителя комплексного коэффициента отражения.



Представим сигналы на выходе ДП в соответствии с тематической моделью 12-полюсного рефлектометра [2]:

$$b_j = \frac{A_j + \Gamma_2 B_j}{C + \Gamma_2 D} a_r, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

где A_j, B_j, C, D — структурные параметры 12-полюсного измерителя; a_r — волна напряжения генератора, равная в данном случае сумме волн напряжения a_1, a_2 , выходящих из делителя; b_j — выходящие волны напряжения, причем одна из них, например b_4 , пропорциональна падающей волне напряжения.

Процедура исключения влияния неквадратичности характеристик ДП состоит из двух этапов [3]. На первом к нагрузочному выходу 12-полюсного измерителя подключается устройство калибровки в виде согласованной нагрузки ($\Gamma_2 = 0$). При этом с помощью аттенюатора и фазовращателя (калибратора фазы) изменяют амплитуду и фазу волны напряжения a_1 до тех пор, пока выходной сигнал с ДП, подключенного к выходу волны напряжения b_4 , не станет равным нулю. Это соответствует тому, что сигнал U_{\min} на выходе сумматора сигналов, представляющий собой векторную сумму двух сигналов, пропорциональных волнам напряжений a_1, a_2 (они равны по амплитуде и противоположны по фазе), также равен нулю, т. е.

$$U_{\min} = U_1 + U_1 \exp(j180^\circ) = 0. \quad (2)$$

Затем, изменяя фазу выходящей волны напряжения a_1 , устанавливают максимальное значение сигнала на выходе сумматора равным U_{\max} , что соответствует сумме двух сигналов, равных по амплитуде и фазе:

$$U_{\max} = 2U_1. \quad (3)$$

После этого фазовращателем устанавливают фазу выходящей волны напряжения a_1 , равную фазе φ_0 , при которой значение сигнала U_0 на выходе сумматора:

$$U_0 = U_1 \sqrt{1 - \cos \varphi_0} = 0,2 U_{\max}. \quad (4)$$

Сигнал выбирается, исходя из требований динамического диапазона сигналов на выходе ДП, а также из условия, что отношение сигнал/шум не должно быть меньше 40 дБ.

Для сигнала на выходе сумматора, равного U_0 , сигналы $P_{01} - P_{04}$ с ДП пропорциональны в данном случае квадрату модуля выходящих волн напряжения b_j и соответственно равны

$$P_{0j} = |b_j|^2 = \left| \frac{A_j}{C} \right|^2 |U_1^2 (1 - \cos \varphi_0)|, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

Эти сигналы запоминаются в ЭВМ и в дальнейшем служат в качестве опорных сигналов при измерении комплексного коэффициента отражения.

При подключении к выходу 12-полюсного измерителя нагрузки с комплексным коэффициентом отражения, равным Γ_n , напряжения на выходе ДП изменяются в общем случае не пропорционально квадрату модуля входящих волн напряжения (из-за неквадратичности характеристики ДП) и становятся равными

$$P_{nj} = |b_{nj}|^{2+\Delta n} = \left| \frac{A_j + \Gamma_n B_j}{C + \Gamma_n D} \right|^{2+\Delta n} \times U_1^{2+\Delta n} (1 - \cos \varphi_0)^{1+\frac{\Delta n}{2}}, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (6)$$

где Δ_n — значение, характеризующее отклонение характеристики ДП от квадратичной характеристики.

Сигналы P_{nj} поступают в ЭВМ и сравниваются соответственно с опорными сигналами P_{0j} . При этом вырабатывается управляющий сигнал, пропорциональный разности амплитуд сравниваемых сигналов. Управляющий сигнал поступает на вход калибратора фазы, который изменяет фазу сигналов на входе сумматора, приводя к изменению сигнала на выходе сумматора мощности. Амплитуда сигнала изменяется до тех пор, пока значения амплитуд поступившего и опорного сигналов не станут равными. Зная первоначальное значение фазы φ_0 калибратора фазы и значение фазы φ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) после изменения фазы, обусловленное разностью амплитуд, запишем выражение для сигналов с выхода сумматора:

$$U_{0nj} = U_1 \sqrt{1 - \cos \varphi_j}, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (7)$$

В этом случае значение волны напряжения не выходит за пределы квадратичного участка характеристики ДП, и значения сигналов P_{0nj} на выходе ДП соответственно равны опорным сигналам $P_{01} - P_{04}$:

$$P_{0nj} = |b_{0nj}|^2 = \left| \frac{A_j + \Gamma_n B_j}{C + \Gamma_n D} \right|^2 U_1^2 (1 - \cos \varphi_j) = \left| \frac{A_j}{C} \right|^2 U_1^2 (1 - \cos \varphi_0) = P_{0j}, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (8)$$

Преобразуем уравнение (8) и получим систему уравнений для определения комплексного коэффициента отражения:

$$\left| \frac{A_j + \Gamma_n B_j}{C + \Gamma_n D} \right|^2 = \frac{P_{0j}}{U_1^2 (1 - \cos \varphi_j)}, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (9)$$

Для исключения величины U_1^2 поделим первые три уравнения на четвертое и получим систему нормированных уравнений для определения комплексного коэффициента отражения:

$$\left| \frac{A_j + \Gamma_n B_j}{A_4 + \Gamma_n B_4} \right|^2 = \frac{P_{0j} (1 - \cos \varphi_4)}{P_{04} (1 - \cos \varphi_j)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (10)$$

которую можно преобразовать к системе уравнений вида:

$$\left| \frac{C_1 + \Gamma_n D_1}{1 + \Gamma_n Q} \right|^2 = \frac{P_{01} (1 - \cos \varphi_4)}{P_{04} (1 - \cos \varphi_1)} = N_1; \quad (11)$$

$$\left| \frac{C_2 + \Gamma_n D_2}{1 + \Gamma_n Q} \right|^2 = \frac{P_{02} (1 - \cos \varphi_4)}{P_{04} (1 - \cos \varphi_2)} = N_2; \quad (12)$$

$$\left| \frac{C_3 + \Gamma_n D_3}{1 + \Gamma_n Q} \right|^2 = \frac{P_{03} (1 - \cos \varphi_4)}{P_{04} (1 - \cos \varphi_3)} = N_3, \quad (13)$$

где $C_1 = \frac{A_1}{A_4}$, $C_2 = \frac{A_2}{A_4}$, $C_3 = \frac{A_3}{A_4}$, $D_1 = \frac{B_1}{A_4}$, $D_2 = \frac{B_2}{A_4}$, $D_3 = \frac{B_3}{A_4}$, $Q_1 = \frac{B_4}{A_4}$ — неизвестные комплексные параметры 12-полюсного измерителя, определяемые в процессе калибровки.

Рассмотрим метод калибровки, используя систему уравнений (10), представленную следующим образом:

$$N_j = |C_j|^2 \left| \frac{1 + \Gamma_k G_j}{1 + \Gamma_k Q} \right|^2 = |C_j|^2 \frac{1 + |\Gamma_k G_j|^2 + 2 \operatorname{Re}(\Gamma_k) \operatorname{Re}(G_j) - 2 \operatorname{Im}(\Gamma_k) \operatorname{Im}(G_j)}{1 + |\Gamma_k|^2 + 2 \operatorname{Re}(\Gamma_k) \operatorname{Re}(C) - 2 \operatorname{Im}(\Gamma_k) \operatorname{Im}(C)}, \quad (14)$$

$$j = 1, 2, 3.$$

Для определения неизвестных параметров сформируем систему калибровочных уравнений на основе уравнений (14), используя согласованную нагрузку и подвижную короткозамкнутую нагрузку, фаза коэффициента отражения которой изменяется как $n\pi/4$.

При подключенной согласованной нагрузке определяем параметры C_j :

$$|C_j| = N_{jc}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (15)$$

При подключении подвижной короткозамкнутой нагрузки с комплексным коэффициентом отражения

$$\Gamma_k = e^{j(\pi + 2\beta l)} = e^{j\varphi} \quad (16)$$

(β — постоянная распространения; l — длина линии) сформируем систему калибровочных уравнений для различных значений фаз $\varphi_1 = 180^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ$, $\varphi_3 = 90^\circ$, $\varphi_4 = 0^\circ$, $\varphi_5 = -45^\circ$, $\varphi_6 = -90^\circ$ комплексного коэффициента отражения:

$$\frac{N_{j1}}{|C_j|^2} (1 + |C|^2 - 2|C| \cos \varphi_c) = \quad (17)$$

$$= 1 + |G_j|^2 - 2|G_j| \cos \varphi_{Gj}, \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\frac{N_{j2}}{|C_j|^2} (1 + |C|^2 - \sqrt{2}|C| (\cos \varphi_c + \sin \varphi_c)) = \quad (18)$$

$$= 1 + |G_j|^2 - \sqrt{2}|G_j| (\cos \varphi_{Gj} + \sin \varphi_{Gj}), \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\frac{N_{j3}}{|C_j|^2} (1 + |C|^2 - 2|C| \sin \varphi_c) = \quad (19)$$

$$= 1 + |G_j|^2 - 2|G_j| \sin \varphi_{Gj}, \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\frac{N_{j4}}{|C_j|^2} (1 + |C|^2 + 2|C| \cos \varphi_c) = \quad (20)$$

$$= 1 + |G_j|^2 + 2|G_j| \cos \varphi_{Gj}, \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\frac{N_{j5}}{|C_j|^2} (1 + |C|^2 + \sqrt{2}|C| (\cos \varphi_c + \sin \varphi_c)) = \quad (21)$$

$$= 1 + |G_j|^2 + \sqrt{2}|G_j| (\cos \varphi_{Gj} + \sin \varphi_{Gj}), \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\frac{N_{j6}}{|C_j|^2} (1 + |C|^2 + 2|C| \sin \varphi_c) = \quad (22)$$

$$= 1 + |G_j|^2 + 2|G_j| \sin \varphi_{Gj}, \quad j = 1, 2, 3.$$

Систему уравнений (17)–(22) преобразуем к двум уравнениям вида:

$$\left(K_{j1} + K_{j4} - K_{j3} - K_{j6} \right) (1 + |C|^2) - 2C \left\{ (K_{j1} - K_{j4}) \cos \varphi_c - (K_{j3} - K_{j6}) \sin \varphi_c \right\} = 0, \quad (23)$$

$$j = 1, 2, 3;$$

$$\begin{aligned} & (K_{j1} + K_{j4} - K_{j3} - K_{j6}) (1 + |C|^2) - \\ & - 2C \left[\left\{ (K_{j1} - K_{j4}) - \frac{1}{\sqrt{2}} (K_{j2} - K_{j5}) \right\} \cos \varphi_c - \right. \\ & \left. - \frac{1}{\sqrt{2}} (K_{j2} - K_{j5}) \sin \varphi_c \right] = 0, \end{aligned} \quad (24)$$

$$j = 1, 2, 3,$$

где $K_{ji} = \frac{N_{ji}}{|C_j|^2}$, $j = 1, 2, 3$, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Из уравнений (23) и (24) определяем фазу φ_c и коэффициент C :

$$\varphi_c = \operatorname{arccctg} \frac{(a_1 - a_3)}{(a_4 - a_2)}; \quad (25)$$

$$C = L \pm \sqrt{L^2 - 1}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_1 &= \frac{K_{11} - K_{14}}{K_{11} + K_{14} - K_{13} - K_{16}}; \quad a_2 = \frac{K_{16} - K_{13}}{K_{11} + K_{14} - K_{13} - K_{16}}; \\ a_3 &= \frac{K_{11} - K_{14} - \frac{1}{\sqrt{2}}(K_{12} - K_{15})}{K_{11} + K_{14} - K_{12} - K_{15}}; \quad a_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(K_{15} - K_{12})}{K_{11} + K_{14} - K_{12} - K_{15}}; \\ L &= \frac{(K_{11} - K_{14}) \cos \varphi_c - (K_{13} - K_{16}) \sin \varphi_c}{K_{11} + K_{14} - K_{12} - K_{15}}. \end{aligned}$$

Зная фазу φ_c и коэффициент C , определяем фазы φ_{G_j} и коэффициенты G_j из уравнений (17)—(22).

Модуль и фазу комплексного коэффициента отражения определяем из системы уравнений (10), записав ее относительно неизвестного комплексного коэффициента отражения в виде следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_1 (1 + |C\Gamma_n|^2 + 2\operatorname{Re}(\Gamma_n)\operatorname{Re}(C) - 2\operatorname{Im}(\Gamma_n)\operatorname{Im}(C)) &= \\ = 1 + |G_1\Gamma_n|^2 + 2\operatorname{Re}(\Gamma_n)\operatorname{Re}(G_1) - 2\operatorname{Im}(\Gamma_n)\operatorname{Im}(G_1); \\ R_2 (1 + |C\Gamma_n|^2 + 2\operatorname{Re}(\Gamma_n)\operatorname{Re}(C) - 2\operatorname{Im}(\Gamma_n)\operatorname{Im}(C)) &= \\ = 1 + |G_2\Gamma_n|^2 + 2\operatorname{Re}(\Gamma_n)\operatorname{Re}(G_2) - 2\operatorname{Im}(\Gamma_n)\operatorname{Im}(G_2); \\ R_3 (1 + |C\Gamma_n|^2 + 2\operatorname{Re}(\Gamma_n)\operatorname{Re}(C) - 2\operatorname{Im}(\Gamma_n)\operatorname{Im}(C)) &= \\ = 1 + |G_3\Gamma_n|^2 + 2\operatorname{Re}(\Gamma_n)\operatorname{Re}(G_3) - 2\operatorname{Im}(\Gamma_n)\operatorname{Im}(G_3), \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где $R_j = \frac{N_j}{|C_j|^2}$, $j = 1, 2, 3$.

Таким образом, точность исключения влияния неквадратичности характеристики диодов определяется погрешностью калибратора фазы, которая, например, для калибратора типа Ф1-4 равна $\pm 0,01^\circ$, и погрешностью системы, которая отрабатывает фазу, задаваемую калибратором фазы с погрешностью $\pm 0,05^\circ$. Влияние этих источников можно оценить, моделируя процессы калибровки и измерения на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoer C.A., Hunter J.D. Accurate six-point operation with uncalibrated nonlinear diodes//IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. — 1975. — V. MTT 23, № 12. — P. 978—984.
2. Рясный Ю.В. Обобщенный анализ многополюсных измерителей цепей СВЧ//Измерительная техника. — 1998. — № 6. — С. 55—58.
3. А.С. № 1478151 (СССР). 12-полюсный рефлектометр/ Ю.В. Рясный, О.Б. Журавлева, В.П. Пологрудов. — Оpubл. 1989, Бюл. № 17.

Получено 20.06.09

ИНФОРМАЦИЯ

ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

В конференциях, которые проводит ANConferences, тон обычно задают ведущие ИТ-компании, «изюминку» добавляют пока малоизвестные, но уже имеющие что сказать новички и, их доля, правда, невелика, заказчики. На IV Форуме «Центры обработки данных» диспозиция сохранилась: вендоры в лице IBM, HP, APC by Schneider Electric и Parallels, от системных интеграторов — КРОК, Tieto. Свой проект под скромным названием «межгалактический центр обработки данных» представил «Оверсан-Меркурий».

Главные темы конференции — безопасность, непрерывность работы, преимущества и недостатки удаленных ЦОД, расширение их функциональности в различных отраслях экономики, особенности использования в условиях кризиса. Выступавшие отмечали, что сегодня многие ЦОД работают не на полную загрузку, менее эффективно, чем позволяють современные технологии. Темпы «цодостроительства» замедлились, однако их оснащение проще не стало. На конференции также были затронуты актуальные вопросы виртуализации приложений и операционных систем, снижения текущих расходов на решение энергоемких задач и повышения качества обслуживания сотрудников компаний за счет увеличения количества доступных сервисов и уменьшения времени простоя оборудования.

Форум показал, что многое из того, о чем рассказывали представители мировых вендоров, находит применение в конкретных проектах. Об опыте построения и эксплуатации виртуального ЦОД рассказали Л. Пшеничный, ИТ-директор ГК «Регионы», и А. Григорьев, начальник отдела администрирования Государственного комитета Чувашской Республики по связи и информатизации. Начав выступления с предыстории проекта создания ЦОД для органов власти Чувашии, А. Григорьев привел слова президента поволжской республики: «У нас нет нефти — есть умные люди». Они-то, в частности, из «кучи серверов с кучей проводов» (первоначальная конфигурация в 2006 г.: три стойки, 13 серверов, объем дискового пространства 1 Тбайт, пять сервисов) к 2009 г. построили ЦОД из пяти стоек, 38 нересурсоемких серверов, объем дискового пространства 30 Тбайт, более 50 сервисов. Кстати, к коммерческим ЦОДам госучреждения подчас относятся с предубеждением: по словам А. Григорьева, в их организации даже не рассматривали возможность переноса туда своих данных из соображений безопасности.

Действительно, сегодня в нашей стране, по словам ведущего эксперта компании «Современные телекоммуникации» А. Корсунского, нормативная документация, регламентирующая системные требования к коммерческим дата-центрам, в том числе к качеству предоставляемых услуг, отсутствует. Реальность такова, что с годами оснащение коммерческих дата-центров основными подсистемами инженерной инфраструктуры (непрерывного электроснабжения, прецизионного кондиционирования, раннего обнаружения пожара и пожаротушения, физического безопасности, структурированной кабельной сети, диспетчеризации и мониторинга), несмотря на кризис, улучшается, однако решения APC или HP пока не для всех. Как показывает статистика, спрос на услуги коммерческих дата-центров не снижается и количество предложений растет, а это дает основания надеяться, что скоро показатели качества инженерной инфраструктуры станут важным конкурентным преимуществом, одним из главных критериев выбора для потенциального клиента дата-центра.

Еще один положительный момент — вендоры все чаще идут на добровольную сертификацию, а значит, назрела необходимость создания общественной некоммерческой организации, подобной, например, WiMAX Forum.