

Учет неквадратичности детектирования при обработке результатов измерения параметров волноводных устройств

Афонин И. Л., Бердышев С. Н., Овчаров П. П., Саламатин В. В.
*Институт радиоэлектроники и информационной безопасности,
Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
igor_afonin@inbox.ru*

Статья поступила 4 ноября 2016 г.

Аннотация: *Предлагается методика определения показателя степени вольт-амперной характеристики детектора в интерференционном микроволновом измерителе параметров волноводных устройств. Разработан алгоритм обработки результатов измерения параметров волноводных устройств, учитывающий вычисленный показатель степени.*

Ключевые слова: *СВЧ-детектор, вольт-амперная характеристика, детектирование, микроволновый преобразователь, квадратичный режим.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Учет неквадратичности детектирования при обработке результатов измерения параметров волноводных устройств / Афонин И. Л., Бердышев С. Н., Овчаров П. П., Саламатин В. В. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 2. С. 158—167.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Учет неквадратичности детектирования при обработке результатов измерения параметров волноводных устройств / И. Л. Афонин, С. Н. Бердышев, П. П. Овчаров, В. В. Саламатин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2018. — Т. 1, № 2. — С. 158—167.

Taking into account nonquadratic detection of measurement result processing of waveguide device parameters

I. L. Afonin, S. N. Berdyshev, P. P. Ovcharov, and V. V. Salamatin
*Institute of Radio Electronics and Information Security,
Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299057, Russian Federation
igor_afonin@inbox.ru*

Received on November 4, 2016

Abstract: *The method of current-voltage characteristic determination of a detector in a microwave interference measuring device is proposed. The algorithm for result processing measurement of waveguide device parameters is provided. The algorithm takes into account a calculated exponential quantity.*

Keywords: *SHF demodulator, current-voltage characteristic, detection, microwave converter, quadratic mode.*

For citation (IEEE): I. L. Afonin, S. N. Berdyshev, P. P. Ovcharov, and V. V. Salamatin, "Taking into account nonquadratic detection of measurement result processing of waveguide device parameters," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. I, no. 2, pp. 158–167, 2016. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.2.12

1. Введение

Детекторные секции являются важнейшими неотъемлемыми узлами микроволновых преобразователей, предназначенных для измерителей параметров волноводных устройств, комплексного коэффициента отражения (ККО) и комплексного коэффициента передачи (ККП).

В последнее время предложены и исследованы методы измерения, способы повышения точности методов и средств измерений на основе разработанных алгоритмов калибровок и оптимизации первичных и вторичных преобразователей [1, 2]. В большинстве из них не уделяется должного внимания виду характеристики детектирования. Полагают, что при малых мощностях детектор имеет характеристику, приближающуюся к параболе. Соответствующий режим принято называть квадратичным детектированием, а детектор — квадратичным детектором. Однако зависимость между током детектора и приложенным нормированным высокока-

стотным напряжением может отличаться от квадратичной параболы, при этом ток детектора перестает быть прямо пропорциональным мощности высокочастотного поля. В этом случае возникает составляющая погрешности измерения, обусловленная неквадратичностью детектирования.

Целью данной статьи является разработка методики экспериментального определения характеристик детектирования всех СВЧ-диодов, входящих в микроволновый преобразователь, и корректировка алгоритма обработки результатов измерения с учетом экспериментально полученных данных.

2. Алгоритм обработки

В качестве прототипа рассмотрим алгоритм обработки сигналов, снимаемых с детекторов микроволнового преобразователя (МП), изложенный в работе [1]. Эти сигналы при квадратичном детектировании определяются выражениями:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{q_1 |\dot{E}_\Gamma|^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)]; \\ P_2 &= \frac{q_2 |\dot{E}_\Gamma|^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)]; \\ P_3 &= \frac{q_3 |\dot{E}_\Gamma|^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)]; \\ P_4 &= \frac{q_4 |\dot{E}_\Gamma|^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)], \end{aligned} \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 — сигналы, снимаемые с детекторных головок; q_1, q_2, q_3, q_4 — постоянные коэффициенты; \dot{E}_Γ — комплексная нормированная амплитуда волны, возбуждаемой генератором; $\dot{\Gamma} = \Gamma \cdot e^{i\varphi}$ — ККО исследуемой нагрузки (Γ — модуль, φ — аргумент); φ_1 — набег фазы на участке волновода L от плоскости симметрии МП до плоскости подключения нагрузки; Δ^2 — квадрат модуля определителя фазы МП:

$$\Delta^2 = |1 - \dot{\Gamma} \dot{\Gamma}_\Gamma|^2 = 1 + \Gamma \Gamma_\Gamma - 2\Gamma \Gamma_\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1 + \varphi_\Gamma),$$

где Γ_Γ и φ_Γ — модуль и аргумент ККО выхода генератора соответственно.

В уравнениях (1) не учтено отклонение $\Delta\varphi$ фазового сдвига между волнами, отвечаемыми II и IV щелями [1], от 90° . Это отклонение не превышает $1,6^\circ$ в диапазоне частот волновода и для решения нашей задачи не имеет существенного значения.

При неравенстве показателей степени $n_i \neq 2$ ($i=1,2,3,4$) система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{q_1 |\dot{E}_\Gamma|^{n_1}}{\Delta^{n_1}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_1}; \\
 P_2 &= \frac{q_2 |\dot{E}_\Gamma|^{n_2}}{\Delta^{n_2}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_2}; \\
 P_3 &= \frac{q_3 |\dot{E}_\Gamma|^{n_3}}{\Delta^{n_3}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_3}; \\
 P_4 &= \frac{q_4 |\dot{E}_\Gamma|^{n_4}}{\Delta^{n_4}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_4}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

При подключении к выходу МП согласованной нагрузки ($\Gamma=0$) сигналы, снимаемые с детекторных головок P_{i0} будут равны:

$$\begin{aligned}
 P_{10} &= q_1 |\dot{E}_r|^{n_1}; \quad P_{20} = q_2 |\dot{E}_r|^{n_2}; \\
 P_{30} &= q_3 |\dot{E}_r|^{n_3}; \quad P_{40} = q_4 |\dot{E}_r|^{n_4}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Пронормируем сигналы (2) сигналами (3)

$$\begin{aligned}
 \frac{P_1}{P_{10}} &= \frac{1}{\Delta^{n_1}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_1}; \\
 \frac{P_2}{P_{20}} &= \frac{1}{\Delta^{n_2}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_2}; \\
 \frac{P_3}{P_{30}} &= \frac{1}{\Delta^{n_3}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_3}; \\
 \frac{P_4}{P_{40}} &= \frac{1}{\Delta^{n_4}} \left[\sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)} \right]^{n_4}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Показатели степеней $n_1 \dots n_4$ считаем неизвестными. Для их определения воспользуемся результатами калибровки измерителя по двум короткозамыкающим нагрузкам: $\dot{\Gamma}_{k1} = \Gamma_{k1} e^{i(\varphi + \varphi_1)}$ и $\dot{\Gamma}_{k2} = \Gamma_{k2} e^{i(\varphi + \varphi_2)}$. Здесь модули ККО $\Gamma_{k1} = \Gamma_{k2} = 1$, аргументы $\varphi = 180^\circ$, сдвиги фаз $\varphi_1 = \frac{4\pi L_1}{\lambda_B}$ и $\varphi_2 = \frac{4\pi L_2}{\lambda_B}$ — рассчитываются.

Калибровочные уравнения, полученные при присоединении короткозамыкателей, имеют вид:

$$\begin{aligned} \left[\frac{P_1}{P_{10}} \right]_{1,2} &= \left[\frac{2 \cos \frac{\varphi_{1,2}}{2}}{\Delta_{1,2}} \right]^{n_1}; \\ \left[\frac{P_2}{P_{20}} \right]_{1,2} &= \left[\frac{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{1,2}}{2} \right)}{\Delta_{1,2}} \right]^{n_2}; \\ \left[\frac{P_3}{P_{30}} \right]_{1,2} &= \left[\frac{2 \sin \frac{\varphi_{1,2}}{2}}{\Delta_{1,2}} \right]^{n_3}; \\ \left[\frac{P_4}{P_{40}} \right]_{1,2} &= \left[\frac{2 \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{1,2}}{2} \right)}{\Delta_{1,2}} \right]^{n_4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь индекс 1 относится к результатам первой калибровки, а индекс 2 — к результатам второй калибровки.

Таким образом, получены восемь нелинейных уравнений с шестью неизвестными: n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , Δ_1 и Δ_2 . Известными константами являются результаты измерения, определяемые калиброванными нагрузками.

Для решения уравнений выполним их преобразование и логарифмирование:

Решая совместно первые два уравнения системы (5) для первой калибровки и исключая члены с множителем $\lg \Delta_1$, получим

$$n_2 \lg \left[\frac{P_1}{P_{10}} \right]_1 - n_1 \lg \left[\frac{P_2}{P_{20}} \right]_1 = n_1 n_2 \lg \frac{\cos \frac{\varphi_1}{2}}{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)}. \quad (6)$$

Аналогично решаем два первых уравнения системы (5) для второй калибровки:

$$n_2 \lg \left[\frac{P_1}{P_{10}} \right]_2 - n_1 \lg \left[\frac{P_2}{P_{20}} \right]_2 = n_1 n_2 \lg \frac{\cos \frac{\varphi_2}{2}}{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)}. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) позволяют определить n_1 и n_2 . Для упрощения дальнейших выкладок введем промежуточные обозначения:

$$\lg \left[\frac{P_2}{P_{20}} \right]_1 = A_1; \quad \lg \left[\frac{P_2}{P_{20}} \right]_2 = A_2; \quad \lg \left[\frac{P_1}{P_{10}} \right]_1 = B_1;$$

$$\lg \left[\frac{P_1}{P_{10}} \right]_2 = B_2; \quad \frac{\cos \frac{\varphi_1}{2}}{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)} = C_1;$$

$$\frac{\cos \frac{\varphi_2}{2}}{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)} = C_2.$$

Перепишем уравнения (6) и (7) в новых обозначениях:

$$\begin{aligned} B_1 n_2 - A_1 n_1 - C_1 n_1 n_2 &= 0; \\ B_2 n_2 - A_2 n_1 - C_2 n_1 n_2 &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Преобразуем уравнения (8):

$$\begin{aligned} B_1 n_2 - n_1 (A_1 + C_1 n_2) &= 0; \\ B_2 n_2 - n_1 (A_2 + C_2 n_2) &= 0. \end{aligned}$$

Умножая первое уравнение на B_2 , а второе — на B_1 и вычитая из первого уравнения второе уравнение, получим

$$B_1 n_1 (A_2 + C_2 n_2) = B_2 n_1 (A_1 + C_1 n_2),$$

откуда

$$n_2 = \frac{B_2 A_1 - B_1 A_2}{B_1 C_2 - B_2 C_1}. \quad (9)$$

Аналогично преобразовываем и решаем уравнения (8) относительно n_1 :

$$n_1 = \frac{B_2 A_1 - B_1 A_2}{A_1 C_2 - A_2 C_1}. \quad (10)$$

Из совместного решения по предложенной методике третьего и четвертого уравнений системы (5) находим n_3 и n_4 . Вводя аналогичные промежуточные обозначения

$$\lg \left[\frac{P_4}{P_{40}} \right]_1 = A_3; \quad \lg \left[\frac{P_2}{P_{40}} \right]_2 = A_4; \quad \lg \left[\frac{P_3}{P_{30}} \right]_1 = B_3;$$

$$\lg \left[\frac{P_3}{P_{30}} \right]_2 = B_4; \quad \frac{\sin \frac{\varphi_1}{2}}{\sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)} = C_3;$$

$$\frac{\sin \frac{\varphi_2}{2}}{\sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)} = C_4,$$

получаем:

$$n_3 = \frac{B_4 A_3 - B_3 A_4}{A_3 C_4 - A_4 C_3}; \quad (11)$$

$$n_4 = \frac{B_4 A_3 - B_3 A_4}{B_3 C_4 - B_4 C_3}. \quad (12)$$

Возвращаясь к первоначальным обозначениям, получим все четыре показателя степени:

$$n_1 = \frac{2 \left[\lg \left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)_2 \lg \left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)_1 - \lg \left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)_1 \lg \left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)_2 \right]}{\lg \left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)_1 \lg \left[\frac{\cos \frac{\varphi_2}{2}}{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)} \right] - \lg \left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)_2 \lg \left[\frac{\cos \frac{\varphi_1}{2}}{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)} \right]};$$

$$\begin{aligned}
 n_2 &= \frac{2 \left[\lg \left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)_2 \lg \left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)_1 - \lg \left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)_1 \lg \left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)_2 \right]}{\lg \left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)_1 \lg \left[\frac{\cos \frac{\varphi_2}{2}}{\cos \left(\frac{\pi - \varphi_2}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)} \right] - \lg \left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)_2 \lg \left[\frac{\cos \frac{\varphi_1}{2}}{\cos \left(\frac{\pi - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)} \right]} ; \\
 n_3 &= \frac{2 \left[\lg \left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)_2 \lg \left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)_1 - \lg \left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)_1 \lg \left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)_2 \right]}{\lg \left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)_1 \lg \left[\frac{\sin \frac{\varphi_2}{2}}{\sin \left(\frac{\pi - \varphi_2}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)} \right] - \lg \left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)_2 \lg \left[\frac{\sin \frac{\varphi_1}{2}}{\sin \left(\frac{\pi - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)} \right]} ; \\
 n_4 &= \frac{2 \left[\lg \left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)_2 \lg \left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)_1 - \lg \left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)_1 \lg \left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)_2 \right]}{\lg \left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)_1 \lg \left[\frac{\sin \frac{\varphi_2}{2}}{\sin \left(\frac{\pi - \varphi_2}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right)} \right] - \lg \left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)_2 \lg \left[\frac{\sin \frac{\varphi_1}{2}}{\sin \left(\frac{\pi - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)} \right]} .
 \end{aligned}$$

Систему измерительных уравнений (4) перепишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
 n_1 \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)^2} &= \frac{1}{\Delta^2} \left[1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1) \right]; \\
 n_2 \sqrt{\left(\frac{P_2}{P_{20}} \right)^2} &= \frac{1}{\Delta^2} \left[1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1) \right]; \\
 n_3 \sqrt{\left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)^2} &= \frac{1}{\Delta^2} \left[1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1) \right]; \\
 n_4 \sqrt{\left(\frac{P_4}{P_{40}} \right)^2} &= \frac{1}{\Delta^2} \left[1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1) \right].
 \end{aligned} \tag{13}$$

Правая часть уравнений в системе (13) соответствует [1], а следовательно, и алгоритм обработки сигналов остается таким же, как в [1]

$$U_c = n_1 \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_{10}} \right)^2} + n_3 \sqrt{\left(\frac{P_3}{P_{30}} \right)^2} = \frac{2(1 + \Gamma^2)}{\Delta^2}. \tag{14}$$

Пронормируем уравнение системы (13) относительно (14)

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{1}{U_c} n_1 \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_{10}}\right)^2} = \frac{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)}{2(1 + \Gamma^2)}; \\
 U_2 &= \frac{1}{U_c} n_2 \sqrt{\left(\frac{P_2}{P_{20}}\right)^2} = \frac{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)}{2(1 + \Gamma^2)}; \\
 U_3 &= \frac{1}{U_c} n_3 \sqrt{\left(\frac{P_3}{P_{30}}\right)^2} = \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)}{2(1 + \Gamma^2)}; \\
 U_4 &= \frac{1}{U_c} n_4 \sqrt{\left(\frac{P_4}{P_{40}}\right)^2} = \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1)}{2(1 + \Gamma^2)}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

В результате нормировки из уравнений исключен множитель Δ^2 .
Сформируем разность сигналов

$$\begin{aligned}
 U_{P1} &= U_3 - U_1; \\
 U_{P2} &= U_4 - U_2.
 \end{aligned}$$

Из (15) получаем

$$U_{P1} = \frac{2\Gamma}{1 + \Gamma^2} \cos(\varphi + \varphi_1); \quad (16)$$

$$U_{P2} = \frac{2\Gamma}{1 + \Gamma^2} \sin(\varphi + \varphi_1). \quad (17)$$

Используя (16) и (17), имеем

$$\frac{2\Gamma}{1 + \Gamma^2} = \sqrt{U_{P1}^2 + U_{P2}^2} = N. \quad (18)$$

Откуда

$$\Gamma = \frac{1}{N} - \sqrt{\frac{1}{N^2} - 1}. \quad (19)$$

Аргумент φ определяется также из совместного решения уравнений (16) и (17)

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_{P2}}{U_{P1}}\right) - \varphi_1. \quad (20)$$

3. Заключение

Предложенная методика определения показателей степеней ВАХ диодов в четырехдетекторном микроволновом преобразователе, основанная на использовании двух калибровок по короткозамыкающим нагрузкам, позволяет учесть неквадратичность характеристик СВЧ-диодов и определить модуль и аргумент ККО исследуемого волноводного устройства с более высокой точностью.

Список литературы

1. Саламатин В. В., Афонин И. Л., Лашенко И. В. Синтез и анализ широкополосного малогабаритного СВЧ-преобразователя и измерителя коэффициента отражения на его основе // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2002. Т. 45, № 6. С. 35—42.
2. Berdyshev S. N. The loss in a dielectric medium with synthesis and analysis with a circular polarization coupler in a metal–dielectric strip waveguide // Radioelectronics and communications systems. 2006. Т. 49, № 6. С. 11—17.

References

- [1] V. V. Salamatin, I. L. Afonin, and I. V. Lashchenko, “Synthesis and analysis of broadband compact microwave transducer and based its measuring device of the reflection coefficient,” *Izv. vuzov. Radioelektronika*, vol. 45, no. 6, pp. 35–42, 2002. (In Russ.).
- [2] S. N. Berdyshev, “The loss in a dielectric medium with synthesis and analysis with a circular polarization coupler in a metal–dielectric strip waveguide,” *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 49, no. 6, pp. 11–17, 2006. (In Russ.).