

УДК 621.317.74

И.В. Лашенко, доцент, канд. техн. наук,

В.И. Носкович,

П.П. Овчаров

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Предложен алгоритм обработки калибровочной и измерительной информации, снимаемой с датчиков мощности калибруемого волноводно-щелевого преобразователя, исключающий частотную погрешность измерителя комплексных коэффициентов отражения (ККО).

В работе [1] выполнен анализ идеализированного варианта четырехдетекторного волноводно-щелевого преобразователя (ВЩП). На рисунке 1 показано схематическое изображение щелей связи, прорезанных в широкой стенке волновода ВЩП. Фазовые сдвиги между волнами, ответвляемыми поперечной щелью 2 и наклонными щелями 1 и 3, считались одинаковыми, равными $\pi/4 + \Delta\varphi$, а фазовый сдвиг между волной 2 и волной 4 (ответвляемой продольной щелью 4) не зависит от частоты и равен 90° .

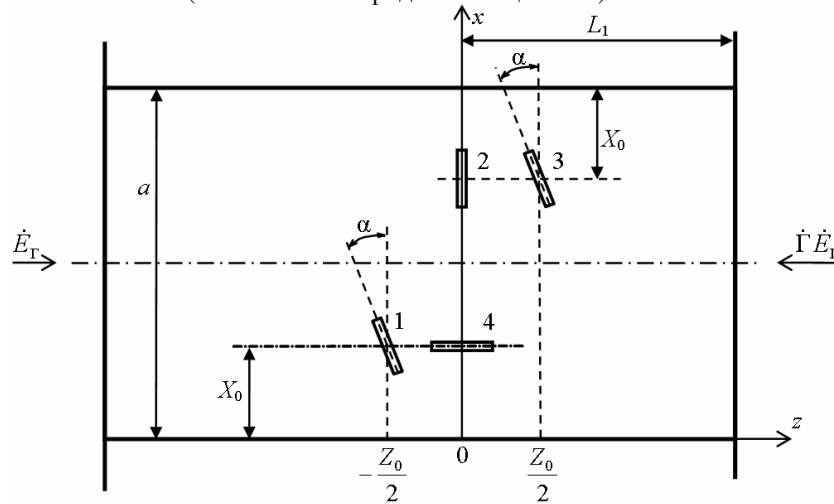


Рисунок 1 — Щели связи на широкой стенке ВЩП

Однако в реальном случае при неточном изготовлении щелей фазовый сдвиг между волнами 2 и 1 равен $\varphi_{21} = \pi/4 + \Delta\varphi_{21}$, между 2 и 3 — $\varphi_{23} = \pi/4 + \Delta\varphi_{23}$ и между 2 и 4 — $\varphi_{24} = \pi/2 + \Delta\varphi_{24}$. Отклонения $\Delta\varphi_{21}$, $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{24}$ от оптимальных значений фазовых сдвигов при изменении частоты приводят к появлению существенной частотной погрешности измерителя.

Целью статьи является разработка алгоритма обработки калибровочной и измерительной информации, который позволит исключить частотную погрешность, вызванную отклонением фазовых сдвигов φ_{21} и φ_{23} от 45° , φ_{24} от 90° .

С учетом фазовых соотношений $\varphi_{24} = \pi/2 + \Delta\varphi_{24}$, $\varphi_{21} = \pi/4 + \Delta\varphi_{21}$ и $\varphi_{23} = \pi/4 + \Delta\varphi_{23}$ выражения для мощности сигналов $P_1 \dots P_4$, снимаемой с датчиков мощности ВЩП, могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{q_1 E_G^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1 - 2\Delta\varphi_{21})]; \\ P_2 &= \frac{q_2 E_G^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)]; \\ P_3 &= \frac{q_3 E_G^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1 + 2\Delta\varphi_{23})]; \\ P_4 &= \frac{q_4 E_G^2}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1 + 2\Delta\varphi_{24})], \end{aligned} \quad (1)$$

где E_G — нормированная комплексная амплитуда волны генератора; q_i ($i = 1, 2, 3, 4$) — коэффициенты передачи каналов датчиков мощности; $\Gamma = \Gamma e^{j\varphi}$ — ККО исследуемого устройства; $\varphi_1 = 4\pi L_1 / \lambda_B$ —

фазовый сдвиг на отрезке волновода длиной L_1 ; λ_B — длина волны в волноводе; $\Delta^2 = |1 - \frac{P_1}{P_{1o}}|^2$ — квадрат модуля определителя графа ВЦП; $\frac{P_1}{P_{1o}}$ — ККО выхода генератора.

При калибровке измерителя по согласованной нагрузке ($\Gamma = \Gamma_{CH} = 0$) выражения для мощности сигналов, снимаемых с датчиков мощности, имеют вид:

$$P_{io} = q_i \left| \frac{P_1}{P_{1o}} \right|^2. \quad (2)$$

Нормируя мощность P_i (1) с помощью P_{io} (2), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{P_{1o}} &= \frac{1}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1 - 2\Delta\varphi_{21})]; \\ \frac{P_2}{P_{2o}} &= \frac{1}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1)]; \\ \frac{P_3}{P_{3o}} &= \frac{1}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1 + 2\Delta\varphi_{23})]; \\ \frac{P_4}{P_{4o}} &= \frac{1}{\Delta^2} [1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_1 + 2\Delta\varphi_{24})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Калибровка и нормирование исключают влияние на результаты измерения модуля и фазы ККО амплитуды волны генератора и коэффициентов передачи q_i . Решение системы уравнений (3) дает возможность определить искомые параметры Γ и φ .

Фазовый сдвиг φ_1 на отрезке волновода длиной L_1 рассчитывается по формуле $\varphi_1 = 4\pi L_1 / \lambda_B$, а отклонения $\Delta\varphi_{21}$, $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{24}$ от номинальных фазовых сдвигов между волнами, ответвляемыми щелями, находятся экспериментально с помощью калибровки с использованием подвижного короткозамыкателя. При подключении к выходному фланцу ВЦП короткозамыкателя в волноводе устанавливается режим стоячей волны. Измеряя расстояния между узлами поля, соответствующие положениям щелей датчиков мощности, при перемещении короткозамыкателя, рассчитываем величины $\Delta\varphi_{21}$, $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{24}$ по формулам:

$$\Delta\varphi_{21} = \frac{2\pi \Delta Z_{21}}{\lambda_B} - \frac{\pi}{4}, \quad \Delta\varphi_{23} = \frac{2\pi \Delta Z_{23}}{\lambda_B} - \frac{\pi}{4}, \quad \Delta\varphi_{24} = \frac{2\pi \Delta Z_{24}}{\lambda_B} - \frac{\pi}{2}.$$

Здесь ΔZ_{21} , ΔZ_{23} , ΔZ_{24} — расстояния от второй щели до первой, третьей, четвертой соответственно.

Исключение влияния многочлена Δ^2 на результаты измерения модуля Γ и фазы φ ККО осуществляется благодаря предложенным алгоритмам решения системы уравнений (3).

Для определения фазы φ ККО рассчитывается вспомогательная величина

$$B = \left(\frac{P_1}{P_{1o}} - \frac{P_3}{P_{3o}} \right) / \left(\frac{P_2}{P_{2o}} - \frac{P_4}{P_{4o}} \right) = \frac{\sin(\varphi + \varphi_1 - 2\Delta\varphi_{21}) + \sin(\varphi + \varphi_1 + 2\Delta\varphi_{23})}{\cos(\varphi + \varphi_1) + \cos(\varphi + \varphi_1 - 2\Delta\varphi_{24})}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) находим

$$\varphi = \arctg \frac{B \cos^2 \Delta\varphi_{24} + \sin(\Delta\varphi_{21} - \Delta\varphi_{23}) \cos(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{23})}{\cos(\Delta\varphi_{21} - \Delta\varphi_{23}) \cos(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{23}) + B \sin \Delta\varphi_{24} \cos \Delta\varphi_{24}} - \varphi_1. \quad (5)$$

Для получения решения системы уравнений (3) относительно модуля Γ находим вспомогательную величину

$$C = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_1}{P_{1o}} - \frac{P_3}{P_{3o}} \right)^2 + \left(\frac{P_2}{P_{2o}} - \frac{P_4}{P_{4o}} \right)^2}}{\frac{P_2}{P_{2o}} + \frac{P_4}{P_{4o}}}. \quad (6)$$

Подставив в уравнение (6) уравнения (3) определяем

$$C = \frac{2\Gamma \sqrt{(\sin(\varphi + \varphi_1 - 2\Delta\varphi_{21}) + \sin(\varphi + \varphi_1 - 2\Delta\varphi_{23}))^2 + (\cos(\varphi + \varphi_1) + \sin(\varphi + \varphi_1 + 2\Delta\varphi_{24}))^2}}{2(1 + \Gamma^2) + 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1) - 2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_1 + \Delta\varphi_{24})}. \quad (7)$$

Преобразовав уравнение (7) и решив его относительно Γ , получим

$$\Gamma = N - \sqrt{N^2 - 1}, \quad (8)$$

$$\text{где } N = \frac{1}{C} \left(\sqrt{\sin^2(\varphi + \varphi_1 - \Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{23}) \cos^2(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{23}) + \cos^2(\varphi + \varphi_1 + \Delta\varphi_{24}) \cos^2 \Delta\varphi_{24}} - \sin(\varphi + \varphi_1 + \Delta\varphi_{24}) \sin \Delta\varphi_{24} \right).$$

Для идеального ВЦП фазовые сдвиги $\varphi_{21} = \varphi_{23} = 45^\circ$, $\varphi_{24} = 90^\circ$, т.е. отклонения $\Delta\varphi_{21}$, $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{24}$ равны нулю. При этом модуль Γ и фаза φ в соответствии с (5) и (8) рассчитываются по формулам

$$\varphi_0 = \arctg B ; \Gamma_0 = \frac{1}{C} - \sqrt{\left(\frac{1}{C}\right)^2 - 1} . \quad (9)$$

Вспомогательные величины B и C рассчитываются по результатам измерения нормированных сигналов P_i/P_{io} , снимаемых с датчиков мощности.

Результаты вычислений по формулам (5), (8), (9) сравнивались с паспортными данными измеряемой образцовой меры, в качестве которой использовалось соединение ёмкостной диафрагмы с согласованной нагрузкой. В таблице 1 представлено сравнение погрешности измерений без учёта коррекции ($\delta\Gamma_0$, $\Delta\varphi_0$) и с учётом коррекции ($\delta\Gamma$, $\Delta\varphi$). Чем точнее измеряются отклонения $\Delta\varphi_{21}$, $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{24}$, тем меньше частотная погрешность. Измеренные величины отклонения фазовых сдвигов на некоторых частотах достигали $8,6^\circ$ и рассчитанные по формулам (9) значения модуля и фазы в этих точках имели погрешности $11,7\%$ и $8,7^\circ$, соответственно. Погрешности этих параметров рассчитанных по формулам (5) и (8), уменьшились до $2,4\%$ и $0,14^\circ$.

Таблица 1 — Погрешность расчёта модуля и аргумента ККО с учётом и без учёта отклонений фазовых сдвигов

f , МГц	2800	2900	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600	3700	3800	3900
$\delta\Gamma_0$	-1,77	-2,80	2,75	11,66	1,29	-3,24	0,57	-3,26	-6,93	-5,60	0,48	-0,07
$\delta\Gamma$	-1,70	-2,40	-1,74	-2,43	-1,20	-0,35	0,21	-0,77	-0,48	-1,39	-1,90	-2,73
$\Delta\varphi_0,^\circ$	-1,89	2,12	-3,05	-8,77	-0,76	0,93	0,96	1,29	1,54	-4,29	-9,64	-5,09
$\Delta\varphi,^\circ$	-0,59	0,32	0,20	0,14	0,52	-1,07	0,00	0,00	-0,35	0,14	-0,03	0,14

Таким образом, экспериментальное определение отклонений фазовых сдвигов волн в четырёхщелевом ВЩП и учёт их при расчёте модуля и фазы ККО, в соответствии с разработанным алгоритмом обработки измерительных и калибровочных сигналов, снимаемых с датчиков мощности, позволили уменьшить погрешности измерений этих параметров в несколько раз.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении связаны с анализом измерителя комплексных параметров, составной частью которого является рассмотренный выше микроволновый преобразователь.

Библиографический список

1. Саламатин В.В. Синтез и анализ широкополосного малогабаритного СВЧ преобразователя и измерителя коэффициента отражения на его основе / В.В. Саламатин, И.Л. Афонин, В.И. Лашенко // Изв. Вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 2002. — Т. 45. — № 6. — С. 35 — 42.
2. Гимпиевич Ю.Б. Алгоритм обработки измерительных сигналов микроволнового преобразователя интерференционного типа / Ю.Б. Гимпиевич, В.И. Носкович // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. — 2005. — Вып. 140. — С. 92 — 95.

Поступила в редакцию 16.05.2008 г.