

ЗАСНОВНИК

Національний
науковий центр



"ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЇ"

Журнал зареєстрований у
Державному комітеті
телебачення і радіомовлення
України.

Свідectво про державну
реєстрацію
серія KB №10669
від 25 листопада 2005 р.

Журнал зареєстрований у
Вищій атестаційній комісії
(BAK) України
Постановою президії BAK
від 11 вересня 1997 р. № 27.

Адреса редакції:

61002, Харків,
вул. Миросицька, 42,
ННЦ "Інститут метрології"

Телефон: (057) 704-98-43

Факс: (057) 700-34-47

e-mail:

journal@metrology.kharkov.ua

Журнал видається з 1995 р.

Зміст

Загальна та законодавча метрологія

Г.С.Сидоренко, Ю.Ф.Павленко. О переопределениях основных единиц СИ и их последствиях для метрологии в области электричества и магнетизма 3

В.І.Карташев, Ю.В.Кузьменко, Н.Ф.Московська. Про стан обліку енергетичних ресурсів при наданні житлово-комунальних послуг та механізми його вдосконалення 10

Вимірювання електричних та магнітних величин

М.Н.Сурду, А.А.Ахмадов, С.А.Ахмадов, С.Н.Курсин, А.Л.Ламеко, М.Я.Мухаровский. Прецизионный компаратор для воспроизведения единицы индуктивности и передачи ее размера в диапазоне значений 14

В.В.Аникин, О.И.Коробчанская, В.Л.Постникова. Метрология и автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии. Проблемы и пути их решения 23

Вимірювання в радіоелектроніці

В.М.Волков, О.Б.Зайченко. Погрешности многозондовых микроволновых мультиметров с эквидистантными датчиками 26

Вимірювання теплофізичних величин та температури

А.С.Жагров, В.Ю.Луценко, Ю.С.Оселедчик. Экспериментальное исследование датчика температуры с коммутационным преобразованием термо-ЭДС 29

Вимірювання оптичних та оптико-фізичних величин

А.Д.Купко. Контроль координат цветности дорожных знаков... 37

А.И.Расчектаева. Обеспечение единства измерений мощности и времени распространения оптического излучения в волоконно-оптических системах 43

Вимірювання геометричних величин

А.В.Омельченко, В.С.Купко, С.Б.Ковшов, И.В.Лукин. Метод рандомизации при измерениях с применением цифровых устройств 49

Вимірювання потоку, витрат, рівня, об'єму речовин та тиску

Г.Ю.Народницкий, Е.Ф.Сухомлинов. Погрешность определения вместимости эталонных мерников 1-го разряда на государственном первичном эталоне единицы объёма жидкости ... 54

На допомогу метрологу-практику

Г.К.Ленюк. Визначення похибки вимірювання при невідомій аналітичній залежності функції виходу від параметрів входу ... 59
Об'ява щодо придбання "Покажчика нормативних документів з метрології, чинних в Україні" 60

Інформація

13-та Конференція Міжнародної організації законодавчої метрології та 43-те засідання Міжнародного комітету законодавчої метрології 61

13-те засідання Ради Президента COOMET 64

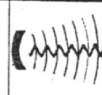
5-е заседание Технического комитета KOOMET ТК 1.4 "Расходомерия" 65

28-е заседание научно-технической комиссии по метрологии... 66

Перелік статей та інших матеріалів, опублікованих в "Українському метрологічному журналі" у 2008 році 67

Пакет методик розрахунку невизначеності вимірювань 71

До відома авторів 72



УДК 621.317

ПОГРЕШНОСТИ МНОГОЗОНДОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ С ЭКВИДИСТАНТНЫМИ ДАТЧИКАМИ

В.М.Волков, доктор технических наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники (ХНУРЕ)

О.Б.Зайченко, ассистент кафедры ХНУРЕ, г. Харьков

Рассмотрено определение погрешности микроволнового мультиметра по погрешностям датчиков по методу накопления частных погрешностей, состоящее в вычислении весовых коэффициентов, дисперсий и ковариаций.

The determination of the error of a microwave multimeter on the basis of sensor errors using the method of partial error accumulation is considered. The determination includes the calculation of weighted coefficients and elements of the matrix of variance and covariance.

Многозондовый микроволновый мультиметр – сравнительно новое средство измерения, предназначенное для определения падающей, отраженной и проходящей в нагрузку мощности, длины волны и комплексного коэффициента отражения нагрузки Γ . Его принцип действия основан на восстановлении картины стоячей волны в тракте по дискретным отсчетам датчиков; расположенных определенным образом вдоль линии передачи. Датчиками могут быть термоэлектрические, термисторные, болометрические, диодные и другие измерительные преобразователи. Сигналы датчиков, пройдя каналы усиления, нормализации и цифровые преобразования, поступают на шину микропроцессорной системы, определяющей значения измеряемых параметров сигнала и тракта.

Реальные датчики [1] отличаются от своих идеализированных моделей нелинейностью и технологическим разбросом характеристик, неточностью, зависимостью коэффициента преобразования от частоты, несмотря на предварительную оценку других погрешностей и внесение поправок. Канал нормализации тоже вносит погрешность.

Известные до сих пор методики определения погрешности многозондовых ваттметров и анализаторов цепей [2–4] имели свои недостатки: вычисления частных производных по сигналам датчиков приводили к громоздкому и неоднозначному результату.

В работах [5, 6] описана двухэтапная процедура оценки: на первом этапе определяется погрешность первичных преобразователей, на втором, – исходя

из результатов первого этапа, рассчитывают погрешность косвенных, совместных, совокупных измерений. Целью данной статьи является определение погрешности измерения проходящей мощности, модуля и фазы комплексного коэффициента отражения на основе двухэтапной процедуры.

Рассмотрим это на примере трехзондового одночастотного мультиметра (рис. 1). В тракте установлено три датчика на расстоянии $\lambda/8$, за начало отсчета принят второй (средний) датчик. Сигналы датчиков описываются следующей системой уравнений при условии идентичности их амплитудных и частотных характеристик:

$$\begin{cases} P_1 = P_{\text{пад}}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi - \theta)); \\ P_2 = P_{\text{пад}}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi); \\ P_3 = P_{\text{пад}}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \theta)). \end{cases}$$

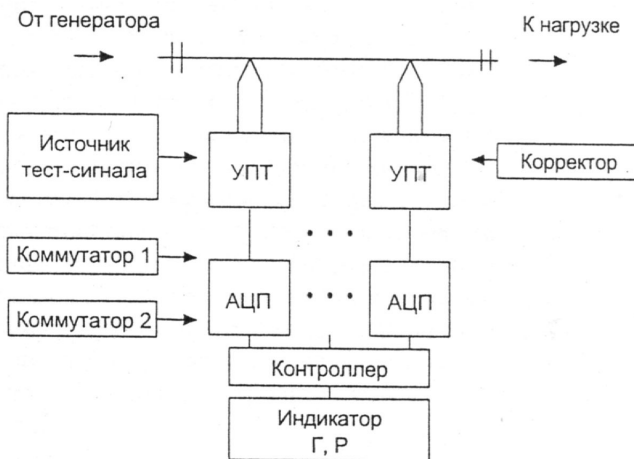


Рис. 1. Многозондовый микроволновый мультиметр

Для системы нелинейных уравнений решение представляет определенную сложность. Поэтому для упрощения произведем их линеаризацию, для чего введем промежуточные переменные и выполним преобразование тригонометрических функций:

$$P = P_{\text{пад}}(1 + \Gamma^2), \Delta P = 2\Gamma.$$

Система уравнений запишется в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \Delta P \cos \varphi \\ \Delta P \sin \varphi \end{bmatrix}.$$

Для перехода от промежуточных значений к искомому значению модуля комплексного коэффициента отражения нагрузки используется соотношение

$$P_{np} = (P^2 - \Delta P^2 \cos^2 \varphi) - \Delta P^2 \sin^2 \varphi. \quad (1)$$

Аналогичные выражения получены для проходящей мощности и фазы комплексного отражения нагрузки.

Общая погрешность измеряемых параметров может быть определена согласно закону накопления частных погрешностей с использованием весовых коэффициентов и среднеквадратических отклонений датчиков. Процедура соответствует повороту эллипсоида рассеяния, но, по сравнению с [7, 8], предлагаемый авторами подход обеспечивает более удобное использование.

Так, для среднего квадратического отклонения проходящей мощности через промежуточные переменные имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{Pnp} = & \left(W_1^2 \sigma_P^2 + W_2^2 \sigma_{\Delta P \cos \varphi}^2 + W_3^2 \sigma_{\Delta P \sin \varphi}^2 + \right. \\ & + 2W_1W_2 \text{COV}_{P, \Delta P \cos \varphi} + 2W_1W_3 \text{COV}_{P, \Delta P \sin \varphi} + \\ & \left. + 2W_2W_3 \text{COV}_{\Delta P \cos \varphi, \Delta P \sin \varphi} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Аналогично можно вычислить среднеквадратические отклонения по модулю и фазе коэффициента отражения.

Чтобы воспользоваться этой формулой, надо решить две задачи: во-первых, определить коэффициенты влияния, во-вторых, найти дисперсии и ковариации.

Весовые коэффициенты вычисляются, исходя из формулы (1), как частные производные по переменным $P, \Delta P \cos \varphi, \Delta P \sin \varphi$:

$$W_1 = \frac{1 + \Gamma^2}{1 - \Gamma^2}; \quad W_2 = \frac{-2\Gamma \cos \varphi}{1 - \Gamma^2}; \quad W_3 = \frac{-2\Gamma \sin \varphi}{1 - \Gamma^2}.$$

Определение дисперсий и ковариаций осуществляется по методу наименьших квадратов (МНК) на основании дисперсионной матрицы, полученной из матрицы системы уравнений. Диагональные элементы данной матрицы представляют собой дисперсии σ^2 , а внедиагональные – ковариации (обозначены cov).

$$\begin{aligned} D = & \begin{bmatrix} \sigma_P^2 & \text{COV}_{P, \Delta P \cos \varphi} & \text{COV}_{P, \Delta P \sin \varphi} \\ \text{COV}_{P, \Delta P \cos \varphi} & \sigma_{\Delta P \cos \varphi}^2 & \text{COV}_{\Delta P \cos \varphi, \Delta P \sin \varphi} \\ \text{COV}_{P, \Delta P \sin \varphi} & \text{COV}_{\Delta P \cos \varphi, \Delta P \sin \varphi} & \sigma_{\Delta P \sin \varphi}^2 \end{bmatrix} = \\ = & \begin{bmatrix} \frac{2\cos^2 \theta + 1}{2(\cos \theta - 1)^2} & -\frac{2\cos \theta + 1}{(\cos \theta - 1)^2} & 0 \\ -\frac{2\cos \theta + 1}{(\cos \theta - 1)^2} & \frac{3}{2(\cos \theta - 1)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(2\sin \theta)^2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Дисперсионная матрица показывает связь между погрешностями датчиков и погрешностями промежуточных переменных.

Полученные аналитические выражения могут быть использованы для моделирования поведения погрешности определения модуля комплексного коэффициента отражения в зависимости от параметров нагрузки и фазового расстояния между соседними датчиками. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

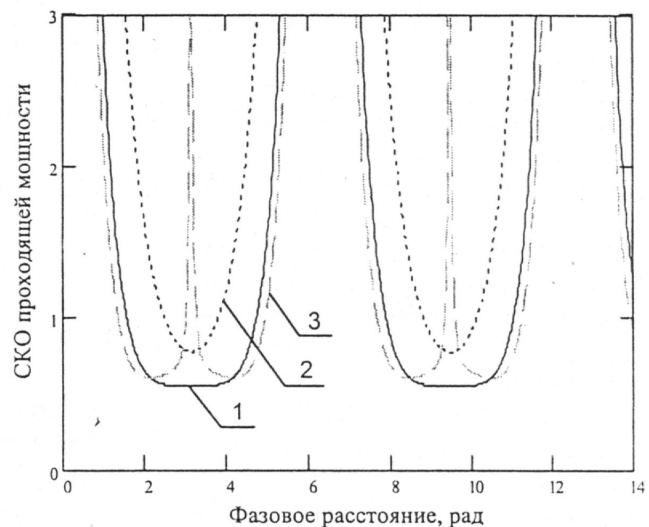


Рис. 2. СКО проходящей мощности трехзондового мультиметра для разных значений фазового расстояния между датчиками: 1 – $\Gamma=0,1$; $\varphi=0$ рад; 2 – $\Gamma=0,5$; $\varphi=0$ рад; 3 – $\Gamma=0,1$; $\varphi=1,5$ рад

Анализируя представленные на рисунке результаты, можно сделать такие выводы: рост погрешности прямопропорционален значению модуля коэффициента отражения, кроме того, существуют частоты, на которых погрешность резко возрастает, что объясняется принципиальной одночастотностью трехзондовой системы. Для расширения полосы частот предлагается увеличить количество датчиков, например, до четырех. В предложенной методике оценки погрешности в таком случае изменения произойдут в элементах дисперсионной матрицы и не затронут весовые коэффициенты. Дисперсионная матрица для четырехзондовой системы имеет вид

$$\begin{aligned} D = & \begin{bmatrix} \sigma_P^2 & \text{COV}_{P, \Delta P \cos \varphi} & \text{COV}_{P, \Delta P \sin \varphi} \\ \text{COV}_{P, \Delta P \cos \varphi} & \sigma_{\Delta P \cos \varphi}^2 & \text{COV}_{\Delta P \cos \varphi, \Delta P \sin \varphi} \\ \text{COV}_{P, \Delta P \sin \varphi} & \text{COV}_{\Delta P \cos \varphi, \Delta P \sin \varphi} & \sigma_{\Delta P \sin \varphi}^2 \end{bmatrix} = \\ = & \sigma_{\text{дат}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \cos 2\varphi & \cos \varphi & 1 & \cos \varphi \\ \sin 2\varphi & \sin \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi \\ 1 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

Проведем моделирование четырехзондовой системы при аналогичных условиях для последующего сравнения результатов.

Сравнение показывает, что по уровню единицы по оси ординат (то есть $\sigma_{пр}/\sigma_{дат}=1$), если опустить перпендикуляры из точек пересечения графиков и линии единичного уровня, четырехзондовая система дает большую полосу частот (рис. 3). Наращивание количества датчиков приводит к дальнейшему расширению полосы за счет усреднения.

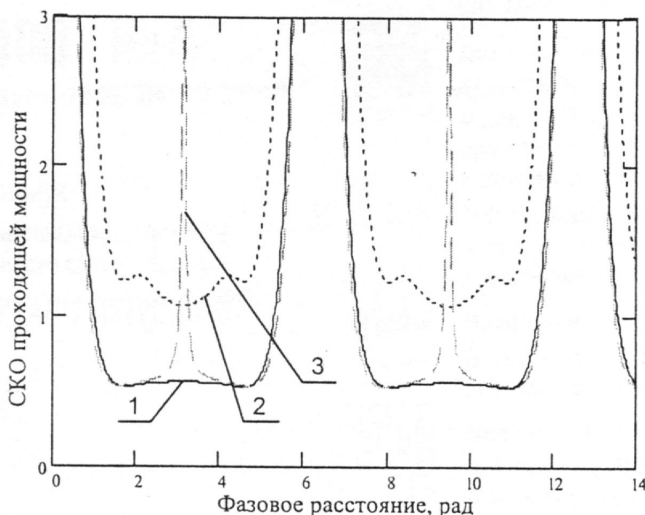


Рис. 3. СКО проходящей мощности четырехзондового мультиметра для разных значений фазового расстояния между датчиками: 1 – $\Gamma=0,1$; $\varphi=0$ рад; 2 – $\Gamma=0,5$; $\varphi=0$ рад; 3 – $\Gamma=0,1$; $\varphi=1,5$ рад

Однако, проблему наличия частот, где погрешность резко возрастает, нельзя решить чисто алгоритмическими средствами, поэтому предлагается дополнить мультиметр аппаратными устройствами перекоммутации, то есть перейти к структурно-алгоритмическим методам коррекции [9, 10], которые будут обсуждаться в следующей статье.

Список литературы

1. Пат. 29881 Украина, МКІ G 01 R 21/04. Универсальный волноводный датчик проходящей мощности СВЧ Волкова /В.М.Волков. -№ 97094883; Заявлено 30.09.97; Опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5. -5 с.

2. Царик Ю.И., Гимпилевич Ю.Б., Ветров И.Л. Влияние конструктивных характеристик многозондовых измерителей на погрешность измерения параметров СВЧ устройств //Радиотехника. - Харьков, 1989. -Вып. 89. -С. 108–114.
3. Яцкевич А.Б.Измерение параметров СВЧ сигналов с помощью многополюсных рефлектометров //Измерительная техника. -1987. -№ 3. -С. 43–46.
4. Егоров А.Б., Захаров И.П., Кукуш В.Д. Выбор оптимальных параметров трехзондовой измерительной линии //Радиотехника. -Харьков, 1990. -Вып. 95. -С. 72–79.
5. Солопченко Г.И. Принцип нормирования, определения и контроля погрешности вычисления в ИИС //Измерительная техника. -1985. -№ 3. -С. 9–11.
6. Чуйко В.Г. Нормирование характеристик, методы испытаний и поверки микроволновых мультиметров //Там же. -1995. -№ 6. -С. 44–46.
7. Колотыгин А.И., Маневич В.З. Погрешность измерения на СВЧ многозондовым преобразователем проходного типа //Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: Сб. -М.: ВНИИФТРИ, 1987. -С. 10–18.
8. Львов А.А., Моржаков А.А., Ширшин С.И., Жуков А.В., Кудряшов Ю.Ю. Измерение параметров СВЧ-двухполюсников методом многозондовой измерительной линии //Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. -1987. -Вып. 7 (401). -С. 48–51.
9. Пат. 20427А Україна, МКІ G 01 R 21/04. Мікрохвильовий багатозондовий мультиметр /В.М.Волков, О.Б.Індіна (Зайченко), В.В.Євдокимов, А.В.Огуй. -№ 96041406; Заявлено 09.04.96; Опубл. 30.10.98, Бюл. № 1. -7 с.
10. Волков В.М., Зайченко О.Б., Огуй А.В. Синтез эквидистантных преобразователей для многозондовых микроволновых мультиметров //Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. -2000. -№ 113. -С. 94–100.