

Рис.3. Реализация тестера для СТДАБ

В системах без памяти логарифм функции правдоподобия (4) можно считать метрикой. Таким обра-

зом, тестер по максимуму правдоподобия вычисляет метрики для каждого возможного вектора диагностических признаков, сравнивает их и принимает решение в пользу максимальной.

Литература: 1. С.Н. Бурдаков, А.П. Верещак, В.Е. Гурьев, С.А.Кривенко Цифровая модель системы технической диагностики с аддитивным гауссовским шумом // Радиоэлектроника и информатика. 2000. № 3. С. 12-15.

Поступила в редколлегию 27.04.2000

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Пресняков И.Н.

Бурдаков Сергей Николаевич, начальник отделения АО НИИРИ. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-52-60.

Верещак Александр Петрович, канд. техн. наук, директор АО НИИРИ. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-52-60.

Гурьев Владимир Ефимович, начальник отдела АО НИИРИ. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-52-60.

Кривенко Станислав Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, начальник сектора АО НИИРИ. Научные интересы: радиотехнические системы технической диагностики. Адрес: Украина, 61054, Харьков, ул. Академика Павлова, 271, тел. 26-52-60.

УДК 621.317

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЗОНДОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ

ВОЛКОВ В.М., ЗАЙЧЕНКО О.Б., ОГУЙ А.В.

Рассматриваются проблемы повышения точности многозондовых микроволновых мультиметров (МММ), исследуются погрешности от неточности датчиков и внеполосных гармонических составляющих генератора.

Многозондовый микроволновый мультиметр - это прибор диапазона СВЧ, действие которого основано на восстановлении картины стоячей волны в волноводном тракте по дискретным отсчетам датчиков. МММ предназначен для измерения падающей, отраженной и проходящей мощности подобно ваттметру СВЧ, а также модуля и фазы коэффициента отражения, как автоматический анализатор цепей (ААЦ). В большинстве случаев сигналы в МММ являются квадратичными по напряженности поля (или линейными по мощности), и как правило, датчики не вносят существенных неоднородностей в передающий тракт. Показания датчиков можно представить выражением

$$P_i = k_i P_{пад} \left[1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\frac{4\pi l_i}{\lambda} + \varphi\right) \right],$$

где $P_{пад}$ - мощность падающей волны;

k_i - коэффициент пропорциональности, связанный с частотной зависимостью коэффициента преобразования, технологическим разбросом (на данном этапе коэффициенты пропорциональности принимаем равными, что является упрощением, в дальнейшем этот фактор будет учтен); Γ - модуль коэффициента отражения нагрузки, подключаемого к выходу преобразователя; j - фаза коэффициента отражения нагрузки, приведенная к плоскости первого чувствительного элемента; l - длина волны в тракте; l_i - расстояние от i -го зонда до первого зонда.

Коэффициент преобразования датчика должен быть частотонезависимым или его характеристика в диапазоне частот должна быть «гладкой». Доминирующая систематическая погрешность коэффициента преобразования обусловлена диссипативным затуханием волны в элементе датчика, а в диапазоне КВЧ - и вдоль волновода.

Среди всех метрологических характеристик важными являются погрешности. Их изучение позволяет выделить такие составляющие погрешности, которые обусловлены: нелинейностью, неидентичностью характеристик датчиков, включая технологический разброс, отражениями от датчиков, неточностью их установки в передающем тракте, неравномерным поглощением мощности и наличием внеполосных составляющих в сигнале генератора, неточностью алгоритма, погрешностью измерительного вычислительного блока, внешними факторами, а также когда применяются инерционные датчики. Основной вклад в погрешность МММ вносит датчик. В качестве датчиков используют диоды Шоттки, болометры или термисторы, термопары, дидаекторы, резистор на горячих носителях и др.

Многие из них имеют высокое быстродействие, но обладают существенно нелинейными характеристиками. Устранить этот недостаток позволяет коррекция результатов измерения, производимая программно с помощью ЭВМ, в памяти которой хранятся аналитические выражения эмпирических характеристик преобразователей, представленные специальными функциями, например, степенными полиномами. Неисключенный остаток нелинейности можно отнести к случайным погрешностям. Их уменьшают статистической обработкой результатов измерений. Хорошие результаты дает использование метода наименьших квадратов, впервые примененного Энгеном для двенадцатиполосных ААЦ, а затем успешно развитого Львовым для многозондовых измерительных линий, которое в сочетании с оптимальным размещением датчиков обеспечивает существенное повышение точности. Для оптимизации размещения датчиков используется D-оптимальное планирование эксперимента, причем матрицу плана эксперимента получают из системы линеаризованных уравнений сигналов датчиков МММ.

Измерение с помощью МММ представляет собой автоматизированное косвенное измерение, когда по сигналам датчиков вычисляют искомые параметры по специальным алгоритмам. Описанные в литературе алгоритмы получены в предположении, что характеристики датчиков идеальны. Нахождение алгоритмов заключается в решении системы линейных уравнений путем вычисления обратной матрицы, как это было предложено Калдекоттом.

При эквидистантном размещении датчиков возможна ситуация, когда алгоритм будет неработоспособным в случае двукратного уменьшения длины волны. В целях преодоления этой критической ситуации предлагается перекоммутация с переходом на систему датчиков, расположенных в кратное число раз ближе друг к другу, чем исходные их положения. Для измерения в одном диапазоне без перекоммутации достаточно пяти зондов. При этом реализация алгоритма несколько усложняется, но даже в таком виде алгоритм реализуется несложными аналоговыми или цифровыми устройствами, что ценно при создании рабочих средств измерения. В первых работах ВНИИФТРИ в качестве оптимального предложено неэквидистантное чебышевское размещение датчиков, учитывающее амплитудно-фазовое распределение поля в волноводе, и их различная чувствительность (в наших обозначениях - коэффициент пропорциональности). В данном случае учитывается неидеальность каждого болометра в многоэлементном датчике МММ. Недостатком такого направления является то, что при этом осуществляется суммирование сигналов. В результате получалась величина, пропорциональная сумме падающей и отраженной мощностей, в то время как проходящая мощность равна их разности. При синтезе направленных ответвителей, в том числе для ваттметров проходящей мощности, это дало ощутимый результат.

Появившийся позднее алгоритм является итерационным. Он достаточно сложен и его применение оправдано в образцовых средствах измерения, для рабочих же средств его реализация довольно сложна.

Анализ двух подходов свидетельствует о том, что оба они не свободны от недостатков: первый — потому, что предполагается использовать идеальные датчики, второй — обработка результатов ведется не вполне рационально. Таким образом, интересен поиск компромиссных вариантов, так как оба подхода имеют ценные достоинства. Например, при неэквидистантном размещении отсутствуют так называемые пораженные частоты, а другой подход, обычно связываемый с эквидистантным размещением датчиков, реализует точную обработку сигналов датчиков.

В настоящей работе более подробно рассмотрены две составляющие погрешности МММ: одна — обусловленная внеполосными составляющими в спектре, другая — неточностью датчиков. В качестве последнего рассмотрим квазиточечные датчики, основанные на принципе поглощающей стенки, разработанные в ХТУРЭ. Достоинствами таких датчиков является взаимозаменяемость, точность, надежность, практическое отсутствие влияния внешней температуры, высокое быстродействие. Поскольку геометрические размеры датчика, имеющего форму диска, конечны, важно определить, как влияет это на погрешность МММ.

Рассмотрим это на примере трехсантиметрового волновода с длиной волны в нем 40 мм (волновод 23x10 мм). В соответствии с теоремой о среднем значении функции на отрезке сигнал неточечного датчика отличается от сигнала точечного датчика:

$$P_{\text{icc}} = \frac{1}{l_{i+1} - l_i} \int_{l_i}^{l_{i+1}} P_1 dl$$

Получены результаты для двух широко применяемых волноводов 23x10 мм и 90x45 мм, соответствующих краям сантиметрового диапазона. На рис. 1 представлена зависимость этой погрешности от длины волны для различных значений модуля коэффициента отражения нагрузки. Погрешность увеличивается с ростом коэффициента отражения и уменьшением длины волны. И для наихудшего случая КСВН=5 составляет 17 % для волновода 23x10 мм, а для волновода 90x45 мм — 1,8 %.

Особый интерес представляет анализ влияния внеполосных составляющих на погрешности МММ с датчиками на основе поглощающей стенки. Методика состоит в нахождении смешанной стоячей волны путем суперпозиции имеющихся гармоник при самом их неблагоприятном фазовом соотношении с учетом зависимости затухания каждой гармоники на чувствительном элементе датчика от частоты. Ранее рассматривалась чувствительность ваттметров на основе направленных ответвителей, пондеромоторных и многоэлементных болометрических датчиков к паразитным гармоническим составляющим генератора и была дана оценка влияния этих составляющих на погрешность измерения [1]. Для этого экспериментально определялась зависимость показаний от частоты в диапазоне первой, второй и третьей гармоник. С помощью специального трансформатора в измерителе моделировались различные типы волн и условия согласования. Сопоставление экспериментальных данных свидетельствует о том, что наименьшей чув-

ствительностью к паразитным гармоническим составляющим среди исследованных ваттметров обладает болометрический ваттметр, а погрешность ваттметра с направленным ответвлением в некоторых случаях превышает допустимые значения.

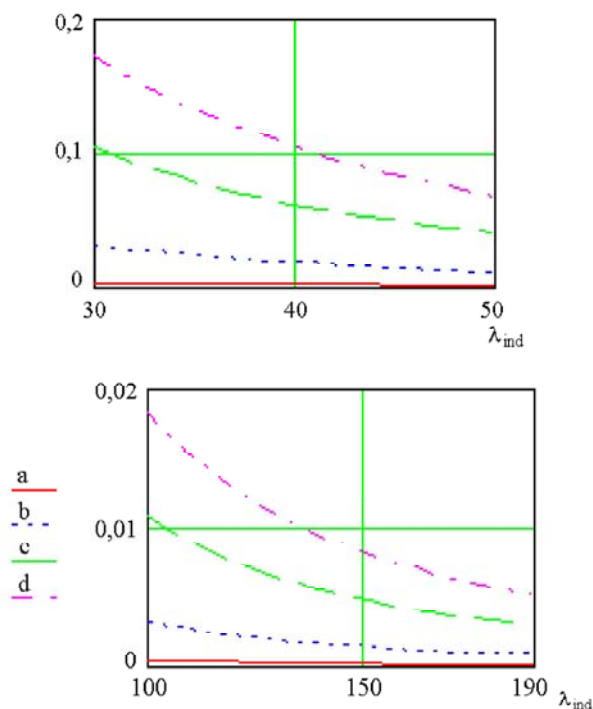


Рис.1. Зависимость погрешности, обусловленной неточностью градиентной термопары от диапазона длин волн для волноводов сечением 23x10 мм и 90x45 мм соответственно

Для определения погрешности МММ с датчиками на основе поглощающей стенки проведено имитационное моделирование. Суть его заключается в сравнении искаженной и идеальной кривых стоячей волны с использованием рабочих алгоритмов и предельных рабочих значений параметров:

$$P_{i, \text{гарм}} = \sum_{k=1}^n P_{k, \text{гарм}},$$

$$P_{k, \text{гарм}} = (a_k)^{i-1} (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(4\pi l_i k / \lambda)),$$

$$a_k = e^{-2\alpha_k l}.$$

Постоянные затухания для различных гармоник вычислены по известным из электродинамики выражениям и составляют для первой, второй, третьей, четвертой гармоник 0,037; 0,053; 0,065; 0,075 соответственно.

Полученные результаты зависимости погрешности измерения проходящей мощности при наличии внеполосных составляющих от соотношения амплитуд гармоник, фазового сдвига между гармониками, модуля коэффициента отражения для случая, когда вторая гармоника – 45 дБ, третья – 47 дБ и четвертая – 50 дБ, представлены на рис.2.

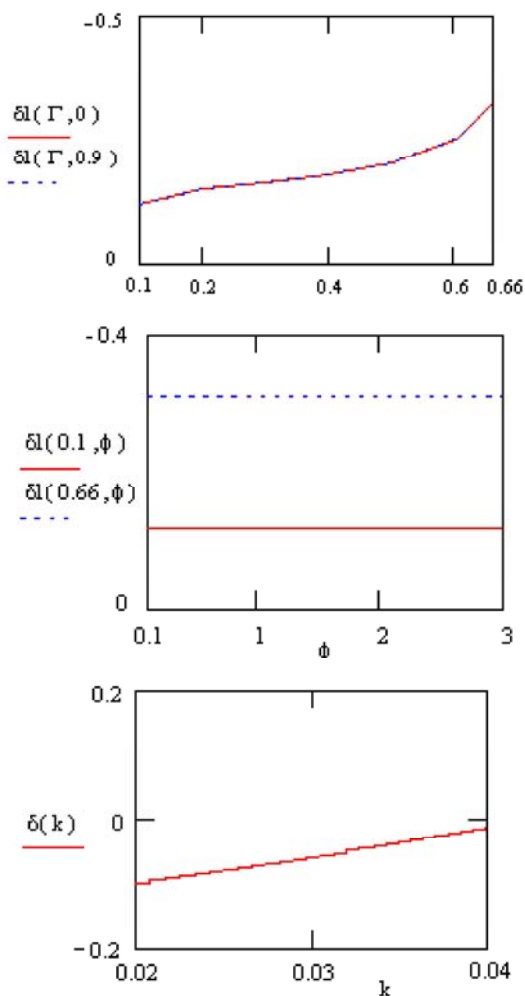


Рис.2. Зависимость погрешности, обусловленной внеполосными составляющими, от модуля, фазы комплексного коэффициента отражения и соотношения амплитуд первой и второй гармоник

Результаты показывают, что при наличии в спектре внеполосных паразитных составляющих -45, -47 и -50 дБ от уровня основного сигнала работоспособность МММ сохраняется и погрешность не выходит за пределы разумных значений.

Литература: 1. Мыльников А.В., Перепелкин В.А., Шпагин Ю.В. Чувствительность ваттметров СВЧ к паразитным гармоническим составляющим сигнала // Измерительная техника. 1980. № 2. С. 37-39.

Поступила в редколлегию 16.06.2000

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

Волков Владимир Михайлович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры МИТ ХТУРЭ. Научные интересы: электродинамика, радиоизмерения, микроволновая техника, метрология. Увлечения и хобби: автомобиль, морские раковины и кораллы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-31, (0572) 72-63-64.

Зайченко Ольга Борисовна, аспирант кафедры МИТ ХТУРЭ. Научные интересы: СВЧ измерения, метрология. Увлечения и хобби: художественная литература. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-31, (0572) 93-17-69.

Огуй Андрей Васильевич, аспирант кафедры МИТ ХТУРЭ. Научные интересы: электрорадиоизмерения, метрология. Увлечения и хобби: радиолюбительство, автомобиль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-31, (05322) 3-45-36.