

УДК 621.317

О.Б. Зайченко¹, И.И. Ключник¹¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МНОГОЗОНДОВОГО МИКРОВОЛНОВОГО МУЛЬТИМЕТРА

Сравнительный анализ современных информационных источников показывает, что существенное влияние на бюджет неопределенности многозондового микроволнового мультиметра (МММ) оказывает более десяти разнообразных источников погрешности. С целью достижения наибольшего уровня снижения погрешности измерений с помощью МММ рекомендуется три доминантных направления оптимизации: использование более точных образцовых средств, уменьшение погрешности рассогласования и уменьшение случайной погрешности за счет обработки сигналов датчиков с учетом современных достижений в оптимальной фильтрации.

Ключевые слова: бюджет неопределенности, многозондовый микроволновый мультиметр

1. Введение

Микроволновые измерения имеют большое значение для целого ряда областей современной науки и техники. Сегодня без таких измерений не могут обходиться в сферах телекоммуникаций, высокоэнергетического воздействия на материалы, в телевидении, медицине, космических исследованиях [1]. При этом традиционные сведения о погрешностях средств измерения на основе многозондового метода [2,3] не отвечают требованиям сегодняшнего дня, ввиду кардинальных изменений и в технических реализациях и в алгоритмах обработки, используемых при определении параметров сигналов и трактов СВЧ. Кроме того, стали доступны зарубежные источники, в связи с чем появилась возможность сопоставить результаты разных школ. При этом следует отметить, что западная концепция неопределенности широко внедряется в практику украинской метрологии. Это приводит к необходимости гармонизации отечественных и западных подходов к определению многих метрологических характеристик. К осознанию подобного рода проблем пришли многие авторы, что и объясняет большое количество работ в этой области в последнее время. Что и заставило авторов обратиться к этой актуальной теме.

Предметная область, а это радиоизмерения диапазона СВЧ, имеет специфику, которая касается номенклатуры измеряемых величин, и наличия особых погрешностей, не встречающихся в других отраслях, например, погрешность рассогласования. На СВЧ полностью охарактеризовать сигналы и тракт позволяют такие параметры, как мощность, комплексный коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны и матрица рассеяния. Именно эти характеристики служат объектом измерения многозондового микроволнового мультиметра.

Обычно для измерения перечисленных пара-

метров используются коммерческие векторные анализаторы цепей. Тем не менее, в некоторых случаях, когда они не применимы или оказываются слишком дорогостоящими, может быть использован альтернативный метод, основанный на двенадцатиполосном рефлектометре. Главное его преимущество – простое СВЧ оборудование. Векторное значение коэффициента отражения вычисляется на основе четырех скалярных значений. Многозондовый рефлектометр, называемый в отечественной литературе микроволновым мультиметром, имеет потенциально высокую точность, достигнуть которую на практике не позволяет ряд погрешностей.

2. Состояние и перспективы повышения точности микроволновых многозондовых мультиметров

Микроволновый мультиметр позволяет измерять и параметры тракта, как анализатор цепей, и параметры сигнала, то есть мощность, как ваттметр. Ценой такой универсальности являются усложнение метрологического обеспечения, удвоение образцовых средств, необходимых для поверки по мощности и отдельно по комплексному коэффициенту отражения, удвоение числа нормируемых метрологических характеристик [4]. В дальнейшем основное внимание акцентировано на измерении мощности. В связи с этим бюджет погрешности составлен в привязке к конкретным мультиметрам, разработанным в Харьковском национальном университете радиоэлектроники с первичными преобразователями на основе поглощающей стенки с термопарами [5]. Безусловно, погрешности вызванные первичными преобразователями другого типа, например, диодами Шоттки, будут отличаться, меняя бюджет погрешности в целом. Но такая привязка к определенному типу преобразователей позволяет получить численные значения оценок.

Бюджет погрешности оценивается с использованием методики, широко распространенной в настоящее время [6]. Все источники погрешности, а их более десяти, проранжированы и приведены в порядке убывания. В табличных данных границы неисключенных систематических погрешностей, взя-

ты, в основном, из работ [2,3], и сгруппированы по коэффициентам, соответствующим принимаемому закону распределения внутри границ. Для равномерного закона распределения коэффициент, соответствующий закону распределения, равен 1,73, а для арксинусного – 1,41.

Таблица 1. Традиционный бюджет неопределенности измерения мощности

| Входная величина | Оценка входной величины, Вт | Стандартная неопределенность, % | Число степеней свободы | Закон распределения входной величины | Коэффициент чувствительности | Вклад неопределенности % |
|---|------------------------------|---|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| проходящая мощность | 100 | 3 | 9 | норм. | 1 | 3 |
| калориметр эталон | – | 4 | ∞ | норм. | 1 | 4 |
| рассогласование | – | 2,83 | ∞ | арксинус. | 1 | 2,83 |
| неточечность датчика | – | 2,31 | ∞ | равном. | 1 | 2,31 |
| погрешность измерительной системы | – | 1,73 | ∞ | равном. | 1 | 1,73 |
| неидентичность датчиков | – | 1,15 | ∞ | равном. | 1 | 1,15 |
| конечная проводимость стенок волноводов | – | 1,15 | ∞ | равном. | 1 | 1,15 |
| частотная погрешность | – | 0,57 | ∞ | равном. | 1 | 0,57 |
| зависимость теплофиз. парам. от температуры | – | 0,28 | ∞ | равном. | 1 | 0,28 |
| нелинейность датчиков | – | 0,28 | ∞ | равном. | 1 | 0,28 |
| гармоники и высшие типы волн | – | 0,06 | ∞ | равном. | 1 | 0,06 |
| размеры волновода | – | 0,06 | ∞ | равном. | 1 | 0,06 |
| Выходная величина | оценка выходной величины, Вт | стандартная суммарная неопределенность, % | эффективное число степеней свободы | уровень доверия | коэффициент охвата | расширенная неопределенность, % |
| Y | 100 | 6,7 | 220 | 0,95 | 1,96 | 13 |

Таким образом, учет всех составляющих показывает, что полученная погрешность (13%) больше не только погрешности новых зарубежных аналогов [7], но и хуже отечественных известных результатов [2,3].

Целью статьи является выявление доминирующих источников погрешностей многозондового мультиметра СВЧ, а также способов повышения точности МММ на основе анализа его бюджета неопределенности.

3. Предлагаемые меры по повышению точности многозондового микроволнового мультиметра

С учетом рассмотренного числа составляющих погрешности измерителя мощности СВЧ наилучший эффект дадут усовершенствования в трех направлениях: использование более точной эталонной базы, уменьшение погрешности рассогласования и уменьшение случайной погрешности за счет обработки сигналов датчиков

средствами, использующими современные достижения в оптимальной фильтрации.

3.1. Усовершенствование образцовых средств

В качестве образцового средства при измерении мощности используется калориметрический ваттметр. Погрешность такого ваттметра составляет в среднем 4%. Однако отдельно аттестованные экземпляры могут иметь погрешность 2,5 % [8]. Такую же величину погрешности измерения мощности может обеспечить применение пондеромоторных ваттметров.

3.2. Устранение погрешности рассогласования

Погрешность рассогласования возникает из-за отличия модели от физического процесса измерения. Чтобы показания первичных преобразователей, с сигналами которых производятся определенные алгебраические действия, давали значение проходящей мощности, по определению [5], следует по-

высить адекватность используемой модели измерений. Побочным эффектом при этом является то, что в конструкцию СВЧ блока вводятся дополнительные датчики, причем располагаются они на расстояниях меньше четверти длины волны. Датчики, расположенные на таком расстоянии, оказывают влияние друг на друга [9], подобно тому как это происходит в фазированных антенных решетках. Таким образом, устранение погрешности рассогласования приводит к появлению другой погрешности – погрешности переотражений между датчиками. Однако, введение дополнительных датчиков, все же, имело смысл, поскольку значение погрешности переотражений оказывается меньше значения погрешности рассогласования.

3.3. Использование оптимальной фильтрации оценок для уменьшения случайных погрешностей

Под оптимальной фильтрацией понимается использование фильтра Калмана [12]. Известно, что в мультиметрах применялся метод наименьших квадратов (МНК) [10]. По сравнению с МНК фильтрация Калмана, с одной стороны, базируется на МНК, но с другой – отличается использованием априорной информации и тем, что носит рекурсивный характер, т.е. по мере поступления новых измерений оценка уточняется. Традиционно используется дискретный фильтр Калмана. Особенностью предлагаемой авторами методики по сравнению с традиционной является пространственная дискретизация, а не временная, что по сути равноценно. Действительно, в многозондовом методе первичные преобразователи эквидистантно располагаются вдоль направления распространения волны, то есть в пространстве. Пока окончательные выводы, что лучше, МНК или фильтр Калмана, делать рано. Сопоставительный анализ следует провести более детально. Фильтр Калмана преимущественно используется в теории управления, также известны его применения в радиолокации, где он зарекомендовал себя очень эффективным средством снижения шумов.

Однако в метрологической практике он практически не встречается. Наиболее близким применением фильтра Калмана можно считать его применение при калибровке двенадцатиполосных анализаторов [11]. Фильтру Калмана применительно к рассматриваемому случаю присущи как достоинства, так и недостатки. Недостатком фильтра Калмана, например, является чувствительность к ошибкам первого приближения, чего нет у МНК [12].

С учетом вышеизложенного составим новый бюджет неопределенности (табл.2).

С учетом вышеизложенного составим новый бюджет неопределенности (табл.2).

Таблица 2. Обновленный бюджет неопределенности измерения мощности

| Входная величина | Оценка входной величины, Вт | Стандартная неопределенность, % | Число степеней свободы | Закон распределения входной величины | Коэффициент чувствительности | Вклад неопределенности % |
|---|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| проходящая мощность | 100 | 1% | 9 | норм. | 1 | 1 |
| калориметр эталон | – | 2,5 | ∞ | норм. | 1 | 2,5 |
| переотражения | – | 2,31 | ∞ | равном. | 1 | 2,31 |
| неточечность | – | 2,31 | ∞ | равном. | 1 | 2,31 |
| погрешность изм. системы | – | 1,73 | ∞ | равном. | 1 | 1,73 |
| неидентичность датчиков | – | 1,15 | ∞ | равном. | 1 | 1,15 |
| конечная проводимость стенок | – | 1,15 | ∞ | равном. | 1 | 1,15 |
| частотная погрешность | – | 0,57 | ∞ | равном. | 1 | 0,57 |
| зависимость теплофиз. парам. от температуры | – | 0,28 | ∞ | равном. | 1 | 0,28 |
| нелинейность датчиков | – | 0,28 | ∞ | равном. | 1 | 0,28 |
| гармоники и высшие типы волн | – | 0,06 | ∞ | равном. | 1 | 0,06 |
| размеры волновода | – | 0,06 | ∞ | равном. | 1 | 0,06 |