

УДК 681.31

Ю.П. Белокурский, Ю.В. Козлов, А.Н. Козлова, И.В. Руженцев

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-ТРАКТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОНДОВОГО МЕТОДА

Рассмотрены методы измерения параметров трактов СВЧ для высокого уровня мощности, предложен итерационный алгоритм реализации многозондового метода, позволяющий уменьшить потенциальную погрешность метода за счет повышения устойчивости алгоритма.

измерители параметров сигналов, СВЧ-диапазон, многозондовый метод

Введение

Энергия колебаний сверхвысоких частот (СВЧ) широко используется в науке и технике, хозяйстве, военной технике и других областях. Особый интерес представляет применение СВЧ-сигналов в научных исследованиях (системы термоядерного синтеза, ускорение элементарных частиц, изучение действия электромагнитных колебаний на материалы и т.п.) с использованием СВЧ высокого уровня средней мощности (больше 10 кВт).

При проектировании средств измерительной техники (СИТ) для высокого уровня мощности СВЧ необходимо учитывать следующие особенности:

- СИТ, встраиваемые в тракт передачи, не должны снижать его пробивную прочность;
- конструкция измерительного узла не должна влиять на волновой состав сигнала (так как существование высших типов волн приводит к большим погрешностям измерения);
- СИТ должно адаптироваться к наличию побочных колебаний в спектре генератора СВЧ [1];
- СИТ должно интегрироваться в систему управления и контроля;
- калибровка СИТ должна осуществляться с минимальным количеством вспомогательных элементов и устройств [2].

К основным методам измерений параметров сигналов и трактов для высокого уровня мощности относятся пондеромоторный, направленных ответвителей, метод, основанный на эффекте Холла, метод поглощающей стенки. Они различаются принципами реализации, потенциальными погрешностями и некоторыми недостатками, ограничивающими их применение [3 – 4].

Для многозондового метода детально изучены и доведены до относительного совершенства измерительные преобразователи (измеритель мощности, реализующий данный метод, доведен до уровня эталонного [5]), в то время как алгоритмы обработки измерительных сигналов глубоко не анализировались в смысле оптимальности метрологических ха-

рактеристик, например, устойчивости [6]. Данная особенность определяет направление усовершенствования многозондового метода путем разработки алгоритмов и решающих правил, обеспечивающих адаптацию к конкретным условиям измерений, **актуальность и цель данной статьи.**

Для сравнения алгоритмов целесообразно использовать критерий устойчивости (отношение погрешности измерительного преобразования к результирующей погрешности), значение которого тем меньше, чем устойчивее алгоритм.

Результаты исследований

Известные алгоритмы измерений на основе многозондового метода, в частности, пятизондового метода [7], предполагают решение системы трансцендентных уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = \frac{k_i E^2}{2} [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 2 \cdot \beta \cdot l_1)]; \\ U_2 = \frac{k_i E^2}{2} [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 2 \cdot \beta \cdot l_2)]; \\ U_3 = \frac{k_i E^2}{2} [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 2 \cdot \beta \cdot l_3)]; \\ U_4 = \frac{k_i E^2}{2} [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 2 \cdot \beta \cdot l_4)]; \\ U_5 = \frac{k_i E^2}{2} [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 2 \cdot \beta \cdot l_5)]. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь U_1, U_2, U_3, U_4 и U_5 - напряжения в измерительной линии;

k_i - коэффициент пропорциональности зондов;

E - напряженность падающей волны;

Γ - модуль комплексного коэффициента отражения;

φ - фаза комплексного коэффициента отражения;

β - параметр, вычисляемый по формуле:

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}, \quad (2)$$

где $\pi = 3,1416$ – постоянная;

λ – длина волны;

l_i – расположение зондов друг относительно друга (для расстояния между i -м и $(i+1)$ -м зондами равным $\lambda/8$), вычисляемые по следующим формулам:

$$\begin{aligned} l_1 &= -\lambda/4; l_2 = -\lambda/8; \\ l_3 &= 0; l_4 = \lambda/8; l_5 = \lambda/4. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение основывается на определении вспомогательных переменных:

$$A = \left[\frac{U_1}{2} + U_2 + U_3 + U_4 + \frac{U_5}{2} \right]; \quad (4)$$

$$B = \frac{\sqrt{(U_2 - U_4)^2 - (U_1 - U_3)(U_3 - U_5)}}{2} \quad (5)$$

и последующем расчете параметров нагрузки сигнала по формулам:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{2 \cdot \sin \theta \cdot (U_2 - U_4)}{U_2 - 2U_3 + U_5} \right]; \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{\sqrt{A+B} - \sqrt{A-B}}{\sqrt{A+B} + \sqrt{A-B}}. \quad (7)$$

Статистическое моделирование с использованием аналитических моделей процесса измерения

многозондовым методом показало, что происходит накопление погрешности расчета параметров, связанное с погрешностью неидентичности зондов, что определяет устойчивость порядка 4-7 по фазе и 3-6 по модулю. Разработан итерационный алгоритм, основанный на восстановлении параметров характеристики распределения стоячей волны в линии передачи методом последовательного перебора параметров нагрузки. Проведено тестовое моделирование [8]. Процесс перебора представлен на рис. 1, где N – вариант перебора, а параметр V_N , характеризующий отклонение восстанавливаемой функции от действительной, определяется по формуле:

$$\begin{aligned} V_N &= (U_{1p} - U_{1д})^2 + \\ &+ (U_{2p} - U_{2д})^2 + (U_{3p} - U_{3д})^2 + \\ &+ (U_{4p} - U_{4д})^2 + (U_{5p} - U_{5д})^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где $U_{1p}, U_{2p}, U_{3p}, U_{4p}, U_{5p}$ – расчетные значения напряженности поля четырехзондовой дискретной измерительной линии, полученные для текущих значений перебора по модулю и фазе комплексного коэффициента отражения;

$U_{1д}, U_{2д}, U_{3д}, U_{4д}, U_{5д}$ – действительные значения напряженности поля четырехзондовой дискретной измерительной линии, полученные путем компьютерного моделирования.

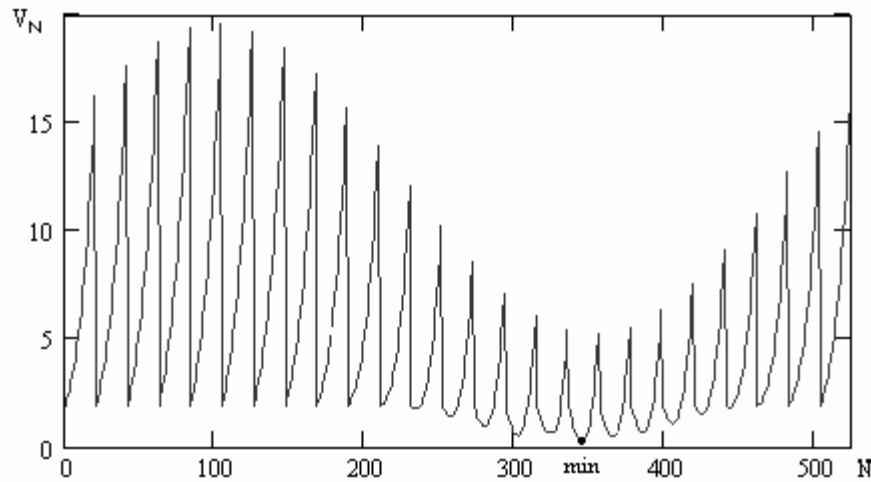


Рис. 1. Процесс перебора параметров

Как видно из рис.1, в процессе перебора существует единственный глобальный минимум. Данный факт и расчетные данные, полученные в результате моделирования, доказывают сходимость предложенного алгоритма.

На рис. 2 представлены зависимости отклонения восстанавливаемой характеристики распределения стоячей волны от действительной вдоль линии передачи x для различных шагов перебора по модулю ($|\Delta\Gamma|$) и фазе ($\Delta\varphi$) комплексного коэффициента от-

ражения. Для исследования влияния шага итераций на качество восстановления характеристики распределения стоячей волны для каждого последующего случая моделирования шаг перебора по модулю и фазе уменьшался вдвое.

На рис. 2 обозначено:

- а – распределение для $|\Delta\Gamma| = 0,1$ и $\Delta\varphi = \pi/6$;
- б – распределение для $|\Delta\Gamma| = 0,05$ и $\Delta\varphi = \pi/12$;
- в – распределение для $|\Delta\Gamma| = 0,025$ и $\Delta\varphi = \pi/24$;
- г – реальное распределение.

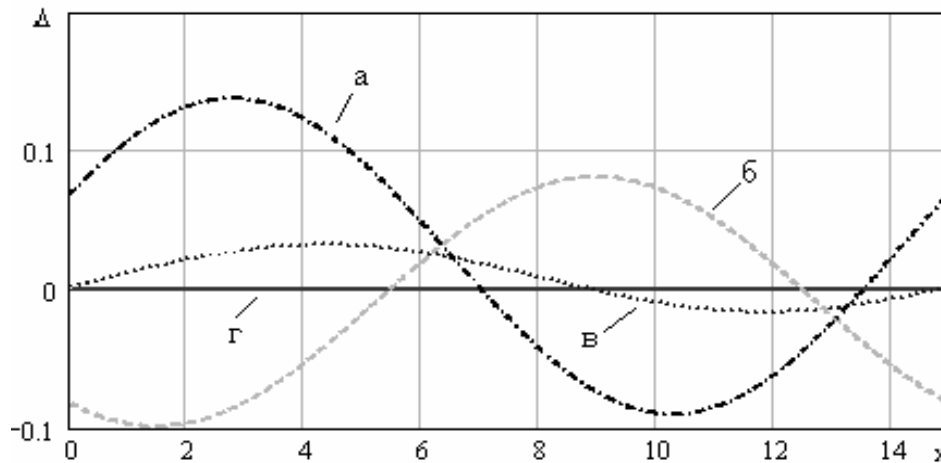


Рис. 2. Зависимость отклонения восстанавливаемой характеристики распределения стоячей волны от действительной вдоль линии передачи

Анализ результатов моделирования (рис. 2) показывает:

– при уменьшении шага перебора восстанавливаемая характеристика приближается к действительной;

– уменьшение шага перебора вдвое приводит к пропорциональному уменьшению погрешности восстановления;

– погрешность восстановления модуля и фазы комплексного коэффициента отражения не превышает половины шага перебора.

В результате моделирования была получена устойчивость для итерационного алгоритма на уровне 2-3 для модуля и фазы. Это означает, что погрешность неидентичности зондов в 1% вызовет результирующие погрешности определения модуля и фазы порядка 2-3%, в отличие от 3-6% по модулю и 4-7% по фазе, получаемых при рассмотренном подходе [7].

Вывод

Предложенный итерационный алгоритм, реализованный на основе многозондового метода, обеспечивает повышение устойчивости определения параметров СВЧ-трактов в несколько раз и является перспективным для реализации.

Список литературы

1. *Побочные колебания электровакуумных приборов СВЧ: Обзоры по электронной технике.* – М., 1970. – 180 с.

2. Чуйко В.Г. Стандартизация ваттметров СВЧ и методы их поверки // *Измерительная техника.* – 1995. – №2. – С. 63-66.

3. Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П., Баймуратов Э.А. Измерение мощности на СВЧ. – М.: Сов. радио, 1976. – 168 с.

4. Перепелкин В.А. Погрешность рассогласования ваттметров СВЧ проходящей мощности // *Измерительная техника.* – 1979. – №10. – С. 65-66.

5. Механников А.И., Перепелкин В.А. Синтез проходных приемных преобразователей для многозондового радиотехнического эталона диапазона СВЧ // *Измерительная техника.* – 1997. – №4. – С. 56-59.

6. Перепелкин В.А., Механников А.И. Об устойчивости алгоритмов микроволновых мультиметров // *Измерительная техника.* – 1995. – №6. – С. 40-43.

7. Егоров А.Б., Захаров И.П., Белокурский Ю.П., Жендубаев В.Н. Автоматизированная система для измерения параметров сигнала и нагрузки в рассогласованных линиях передачи // *Радиотехника. Республ. межвед. науч.-техн. сб.* – Х.: ХИРЭ, 1986. – Вып. 77. – С. 26-35.

8. Козлов Ю.В. Разработка алгоритмов измерения энергетических параметров сигналов при наличии побочных колебаний в трактах // *Материалы международ. НТК студентов, аспирантов и ученых "Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006".* – Севастополь: СевНТУ, 2006. – С. 126.

Поступила в редколлегию 19.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков.