

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СРЕДСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.317

*О.Б. ЗАЙЧЕНКО, И.И. КЛЮЧНИК, канд.техн.наук, М.А. МИРОШНИК, д-р техн. наук,
Р.И. ЦЕХМИСТРО, канд.физ.-мат.наук*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МНОГОЗОНДОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ С ОБРАБОТКОЙ МЕТОДАМИ ФИЛЬТРА КАЛМАНА И НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ПЕРЕОТРАЖЕНИЯ ЗОНДОВ

Введение

При анализе погрешностей от датчиков многозондового микроволнового мультиметра необходимо обращать внимание на составляющие вызванные присутствием явления взаимного влияния между датчиками. Данную задачу можно рассматривать как аналогичную той, что имеет место в антенных решетках [1] и учитывается с помощью метода “наведенных ЭДС”. Исключение из рассмотрения факта взаимного влияния излучателей приводит к ошибкам [1 – 3].

В указанных ситуациях учет погрешности измерений из-за взаимного влияния электромагнитных полей зондов особенно важен, если они находятся на расстояниях, которые не превышают границу дальней зоны.

Следовательно, исключение из рассмотрения взаимного влияния между датчиками, особенно в случае их расположения на расстояниях меньших границы дальней зоны приведет к дополнительной погрешности измерительной системы. Из этого следует, что при моделировании и построении измерительной системы необходимо учитывать взаимное влияние сигналов датчиков, что позволяет современная вычислительная техника.

Влияние переотражений между болометрами учитывается соотношением, связывающим элементы матрицы рассеяния, определяемые экспериментально, но оно ограничивается числом датчиков [4 – 5].

Альтернативой описания с помощью теории СВЧ цепей является применение уравнения энергетического баланса и вектора Пойнтинга, как, например, в работе [6]. Взаимное сопротивление между двумя зондами вертикально расположенными на широкой стенке прямоугольного волновода начали изучать недавно. В работе [6] были подробно изучены распределение поля зонда и взаимные связи. Даны общие формулы взаимного импеданса между зондами. Длина и ориентации двух зондов в волноводе произвольная.

С одной стороны, расстояние между датчиками $\lambda_v/8$ в мультиметре является условием уменьшения погрешности рассогласования, с другой – оно приводит к появлению погрешности переотражения между датчиками. Однако уменьшение погрешности рассогласования даже ценой появления погрешности переотражения оправдано, так как значение последней меньше чем погрешности рассогласования.

Цель работы – сравнительный анализ величины относительной погрешности на основании алгоритмов обработки сигналов датчиков многозондового микроволнового мультиметра, а именно – метода наименьших квадратов и метода фильтрации Калмана, учитывающий взаимное переотражение между зондами. При исследовании варьируется размещение датчиков и их количество.

Постановка задачи

Рассмотрены два случая. Первый из них – датчики расположены посередине широкой стенки вдоль направления распространения энергии (рис.1). Расстояния между соседними датчиками одинаковые и составляют $\lambda_v/8$ [9]. На первом датчике суммируется сигнал

падающей волны, а также отраженный от нагрузки, отраженный от четвертого датчика, отраженный от третьего датчика и отраженный от второго датчика. Всего насчитывается пять слагаемых в выражении для напряжения на первом датчике. На остальных датчиках также учитываются падающие и отраженные сигналы.

Схема двумерного размещения датчиков на широкой стенке показана на рис.1, б.

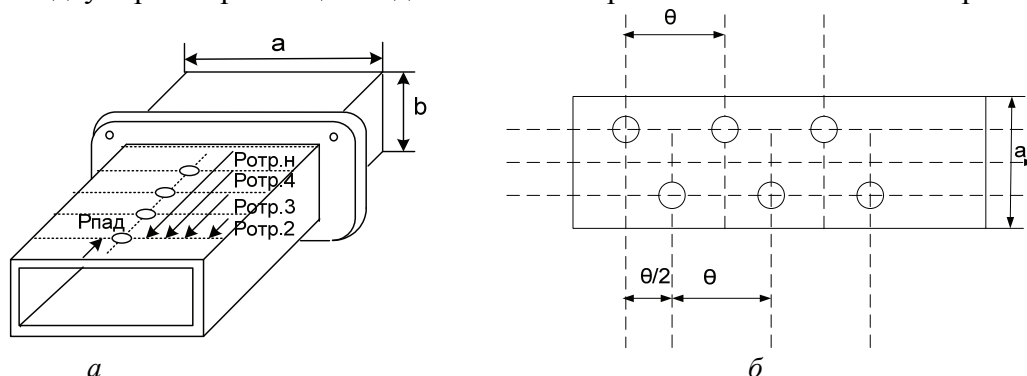


Рис.1. Волноводная секция с нагрузкой
а – с четырьмя датчиками; б – двумерное размещение датчиков

Математическая модель

Как известно теория ориентированных графов позволяет рассчитать передачу со входа на выход устройства, пользуясь правилом некасающихся контуров (правилом Мезона) [10,11]. На рис.1, а представлена модель четырехзондовой секции в предположении о каскадном соединении датчиков и секций волновода без датчиков. Модель получена исходя из матриц рассеяния датчиков с упрощениями. Так, предполагается, что датчик взаимный, то есть коэффициенты передачи со входа на выход и в обратном направлении одинаковы [11]. При построении модели (рис. 2) используется ряд упрощений, во-первых, не учитываются контуры порядка выше первого, так как отражения от датчиков ρ малы ($\rho=0,05$), третьей степени ρ пренебрегаем [11]. Во-вторых, не все контуры первого порядка учитываются, а только с минимальным количеством множителей $e^{-j\gamma x}$, где $\gamma = 2\pi/\lambda_g$ – постоянная распространения, x – геометрическое расстояние между датчиками, λ_g – длина волны в волноводе, при этом $\theta = 2\gamma x = 4\pi x/\lambda_g$ – фазовое расстояние между датчиками, поскольку множитель $e^{-j\gamma x}$ меньше единицы, то с увеличением количества таких множителей всё произведение асимптотически стремится к нулю. В-третьих, считаем датчики имеют идентичную чувствительность.

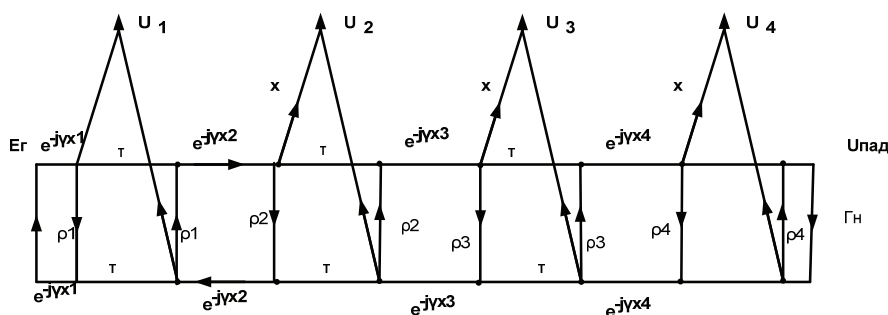


Рис. 2. Направленный граф четырех зондов с учетом переотражений

Сигнал датчика записывают в виде

$$P_i = P_{над} (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi)) = P_{над} (1 + \Gamma e^{-j\varphi})^2 = P_{над} + P_{отр}, \quad (1)$$

где $P_{пад}$ – падающая мощность; $P_{отр}$ – отраженная мощность; Γ – модуль коэффициента отражения нагрузки; φ – фаза коэффициента отражения нагрузки.

Запишем систему уравнений с учетом отражения от нагрузки и от датчиков по пути следования отраженной волны:

$$\begin{cases} P_1 = P_{пад1} + P_{отр.нагр1} + P_{отр41} + P_{отр31} + P_{отр21} \\ P_2 = P_{пад2} + P_{отр.нагр2} + P_{отр42} + P_{отр32} \\ P_3 = P_{пад3} + P_{отр.нагр3} + P_{отр43} \\ P_4 = P_{пад4} + P_{отр.нагр4} \end{cases}, \quad (2)$$

где $P_{пад1}$ – сигнал, падающий на первый датчик от генератора; $\tau = \sqrt{1 - \rho^2}$ – коэффициент передачи; ρ – собственный коэффициент отражения датчика; $P_{отр.нагр1}$ – сигнал, отраженный от нагрузки и падающий на первый датчик; $P_{отр41}$ – сигнал, отраженный от четвертого датчика и попавший на первый; $P_{отр31}$ – сигнал, отраженный от третьего датчика и попавший на первый.

Результаты моделирования

Условием применимости и МНК и фильтрации Калмана является избыточность системы линейных уравнений, то есть когда уравнений больше, чем независимых переменных.

Метод наименьших квадратов (МНК), будучи по сути своей численным, обладает преимуществами перед другими (аналитическими, т.е. линейной алгеброй) методами обработки результатов измерений такими как, например, способность обрабатывать данные большого числа датчиков, содержащие погрешности. Увеличение количества датчиков для многозондового мультиметра в принципе не составляет проблемы. Метод наименьших квадратов (МНК), применяемый в том числе и для многозондовых СВЧ устройств МНК, использовался в работе [7], однако в нем не было учтено взаимное влияние датчиков друг на друга. Для МНК важно предположении о многомерном нормальном законе распределения независимых переменных. На этом основано применение метода максимального правдоподобия, который позволяет поставить в соответствие информационной матрице Фишера произведение матрицы данной системы уравнений и транспонированной. Таким образом, от избыточной системы уравнений переходят к системе уравнений, где число уравнений равно числу независимых переменных, а, значит, полученная система может быть решена обычными методами линейной алгебры. Обращение информационной матрицы Фишера позволяет получить матрицу дисперсии и ковариаций, используемую при анализе точности. Недостатки метода МНК, состоящие в требовании многомерного нормального распределения независимых переменных, можно устранить использованием фильтра Калмана [8].

В этом методе источником априорной информации является решение системы линейных уравнений для трех датчиков. решение которой для трех промежуточных переменных получены методами линейной алгебры. Анализ алгоритма [9] показал его неустойчивую работу в диапазоне частот и большую погрешность, поэтому данный алгоритм нуждается в доработке.

Будем повышать точность путем усложнения обработки. На физическом уровне введем четвертый датчик. Предлагаем такой алгоритм обработки избыточной системы датчиков по методу фильтра Калмана [8]

$$y = b + (M^{-1} + A_1^T R^{-1} A_1)^{-1} A_1^T R^{-1} (p - A_1 b) \dots \dots \dots (3)$$

где b – начальное приближение y ; $b = \begin{bmatrix} -P_1 + 2P_2 \cos \theta - P_3 \\ \frac{2(\cos \theta - 1)}{P_1 - 2P_2 + P_3} \\ \frac{2(\cos \theta - 1)}{P_1 - P_3} \\ \frac{P_1 - P_3}{2 \sin \theta} \end{bmatrix}$; (4)

A_1 – матрица системы уравнений с четырьмя эквидистантными датчиками матрица системы уравнений,

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & \cos 3\theta & \sin 3\theta \\ 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

R – матрица дисперсий и ковариаций ошибок датчиков, на главной диагонали которой расположены дисперсии, а внедиагональные элементы, соответствующие ковариациям, равны нулю:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

M – априорная ковариация ошибок решения находится как погрешность косвенных измерений, которая получается из выражения (4):

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 \cos^2 \theta + \sigma_3^2}{(2(\cos \theta - 1))^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 + \sigma_3^2}{(2(\cos \theta - 1))^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}{(2 \sin \theta)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Расчеты проводились как для четного, так и для нечетного числа датчиков, за начало отсчета был принят последний седьмой датчик. Были проведены расчеты для фазового расстояния θ в диапазоне от $\pi/2$ до $2\pi/3$, которое обусловлено тем, что не выходит за полосу частот волновода, а кроме того представляют интерес сами крайние точки, так как они разными авторами указываются как оптимальные для размещения датчиков на фиксированной частоте.

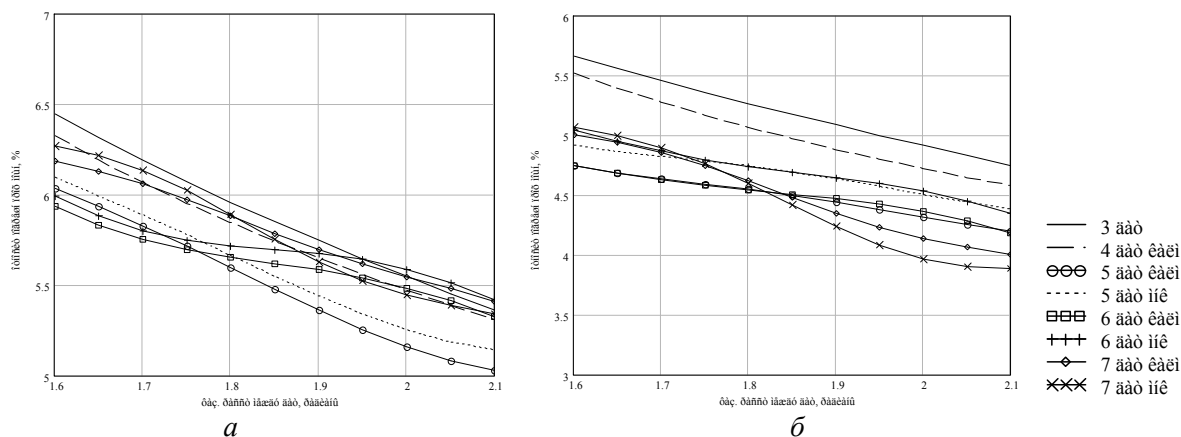


Рис.3. Зависимость погрешности от фазового расстояния между датчиками: a – для одномерного размещения; b – для двумерного размещения

На рис.3, a представлена зависимость относительной погрешности от фазового расстояния для разного количества датчиков, рассчитанная по методу МНК и фильтра Калмана для одномерного размещения датчиков согласно схеме рис.1, a . Из него видно, что с увеличением фазового расстояния погрешность уменьшается. Причем погрешность тем

меньше, чем больше количество датчиков. Обработка результатов по методу фильтра Калмана показала меньшую погрешность при $\theta = 2\pi/3$ и для семи датчиков.

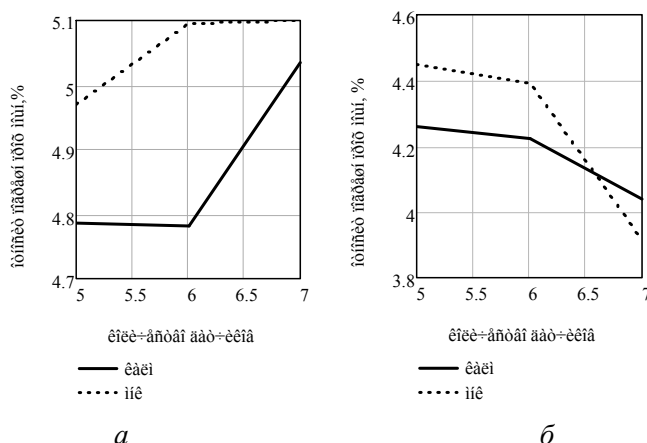


Рис. 4. Зависимость погрешности взаимного расположения от количества датчиков:

а – фазовое расстояние между соседними датчиками $\theta = \pi/2$;

б – фазовое расстояние между соседними датчиками $\theta = 2\pi/3$

На рис.4, а представлена зависимость относительной погрешности проходящей мощности от числа датчиков, из которого видно, что при фиксированном фазовом расстоянии $\theta = \pi/2$ обработку результатов измерений предпочтительней проводить используя фильтрацию Калмана (при $N=5$ $(\Delta P/P)_{\text{МНК}}/(\Delta P/P)_{\text{КАЛМ}}$ уменьшает относительную погрешность на 4 %) для $N=7$ $(\Delta P/P)_{\text{МНК}}/(\Delta P/P)_{\text{КАЛМ}}$ – на 2 %.

Из рис.4, б следует, что при $\theta = 2\pi/3$ обрабатывать результаты измерений предпочтительнее методом фильтра Калмана при $N=5,6$ зондов, а методом МНК – для $N=7$ зондов.

Анализ исследования относительной погрешности измеренной мощности при двумерном размещении зондов (рис.1, б) показал, что погрешность зависит от первого приближения для метода фильтра Калмана. Относительная погрешность оказывается большей по сравнению с одномерным размещением датчиков для одинакового количества датчиков из-за более сильного переотражения сигналов особенно для центрального расположения датчиков (рис.3, б).

Заключение

Анализ зависимости относительной погрешности семизондового микроволнового мультимера от фазового расстояния θ , полученной моделями «фильтр Калмана» и «МНК», показал, что обработка результатов измерений фильтром Калмана дает меньшую относительную погрешность. При $\theta = 2\pi/3$ метод «фильтра Калмана» уменьшает относительную погрешность на 5 %, т.е. на интервале $\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi/3$ предпочтительней его использование.

Увеличение количества датчиков приводит к уменьшению относительной погрешности измерений, что подтверждается графиками (рис.3, 4). При двукратном увеличении количества датчиков относительная погрешность уменьшается примерно в два раза, при $\theta = \pi/2$ $\Delta P/P = 1,506$ – при пяти зондах и $\Delta P/P = 0,8$ – при семи датчиках.

Список литературы: 1. *Воскресенский, Д. И.* Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. – М. : Радиотехника, 2006. – 376 с. 2. *Габриэльян, Д. Д.* Новый критерий пространственно-поляризационной обработки сигналов / Д. Д. Габриэльян, Ю.А. Звездина, Сильницкий С.А. // III Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г. – С.939–941. 3. *Горобец, Н. Н.* Характеристики электромагнитных полей в ближней зоне коротких проволочных антенн / Н. Н. Горобец, Р. И. Цехмистро // Радиофизика и электроника. – 2000. – № 467. – С. 62–66. 4. *Механиков, А. И.* Микроволновый мультиметр и алгоритмы его работы / А. И. Механиков, В.А. Перепелкин // Измерительная техника. – 1994. – №3. – С. 52 – 55. 5. *Механиков, А. И.* Волноводные болометрические преобразователи проходящей мощности // Методы и средства радиотехнических измерений. – Вып. 20(50). – С.3 – 27. 6. *Baisuo, Wang.* Mutual Impedance between Probes in Waveguide // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol.36, No.1, January, 1988. – p.53 – 60. 7. *Львов, П. А.* Применение многополюсных рефлектометров специального вида для решения ряда прикладных задач // Вестник СГТУ. – 2010. – №2(45). – С. 181-192. 8. *Балакришнан, А. В.* Теория фильтрации Калмана / А. В. Балакришнан. – М. : Мир, 1988. – 86 с. 9. *Волков, В. М.* Многозондовый микроволновый мультиметр большого уровня мощности / В.М. Волков, О.Б. Зайченко, А.В. Огуй // Радиотехника. – 2001. – №120. – С. 166 – 169. 10. *Силаев, М. А.* Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М. : Сов.радио, 1970. 11. *Волков, В.М.* О погрешности зондовых ваттметров проходящей мощности СВЧ, обусловленной отражениями от датчиков / В.М. Волков, Л.М. Коротун, В.Д. Кукуш // Радиотехника. – 1972. – С. 120-125.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники,*

*Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта*

Поступила в редколлегию 17.01.2014