

УДК 681.324

М.А. Мирошник<sup>1</sup>, О.Б. Зайченко<sup>2</sup><sup>1</sup> Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В МНОГОЗОНДОВОМ МИКРОВОЛНОВОМ МУЛЬТИМЕТРЕ

Данная статья посвящена исследованию применимости метода фильтрации Калмана в несвойственной для него области, относящейся к радиоизмерениям и сопоставлению точностей, обеспечиваемых этим методом и альтернативными.

**Ключевые слова:** многозондовый микроволновый мультиметр, анализатор цепей СВЧ, алгоритм обработки сигналов датчиков, закон распределения погрешности, шумы, метод наименьших квадратов, фильтр Калмана.

### Введение

Развитие связи, военной и космической техники, решение многих прикладных задач опираются на точные измерения электромагнитных величин [1, 2]. В настоящее время точность существующих анализаторов цепей СВЧ и микроволновых мультиметров [3] во многом достигается за счет использования прецизионных дорогостоящих аппаратуры и СВЧ компонент, которые за последнее время практически достигли совершенства. Поэтому, следуя общей тенденции развития современной измерительной техники, следующий шаг на пути повышения точности СВЧ измерений можно сделать только за счет разработки принципиально новых методов измерения, основанных на обработке измерительной информации на компьютере. Характерной особенностью современных мультиметров и автоматических СВЧ анализаторов является обязательное наличие высокопроизводительного компьютера, который может быть универсальным или специализированным [4 – 5].

При работе любой измерительной системы на её входы поступают искаженные случайными помехами сигналы, содержащие некоторую информацию, которая имеет, таким образом, случайный характер. Для обеспечения выполнения системой её функций или решений осуществляется обработка полученной информации [6 – 7].

Решение проблемы повышения точности измерений современных анализаторов СВЧ и мультиметров прошло определенные этапы развития. Перед тем, как начать анализ последних работ и публикаций, несколько слов о том, что из себя представляет многозондовый микроволновый мультиметр [8 – 9].

В основе работы многозондового микроволнового мультиметра (МММ) лежит принцип воссоздания распределения стоячей волны, которое основывается

на наличии нескольких, чаще квадратичных по полю или линейных по мощности точечных датчиков, расположенных определенным образом вдоль передающего тракта между генератором и нагрузкой.

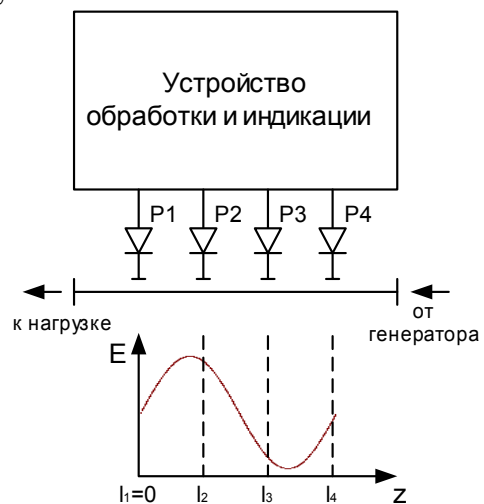


Рис. 1. Многозондовый микроволновый мультиметр

В рассогласованном СВЧ тракте устанавливается стоячая волна. Особенностью этой области измерений является пространственная, а не традиционная временная дискретизация гармонического сигнала (стоячей волны). Описание сигналов датчиков происходит из уравнения стоячей волны. Уравнения датчиков, по сути, единообразны, а отличаются только аргументами косинусов, то есть фазовыми расстояниями.

Последние исследования и публикации свидетельствуют о целесообразности применения математической модели в виде избыточной системы линеаризованных уравнений, которые решаются методом наименьших квадратов (МНК). Действительно, избыточная система уравнений, когда количество уравнений больше, чем число переменных, позволя-

ет повысить точность за счет взаимной компенсации погрешностей датчиков [4, 5]. При избыточном количестве уравнений систему нельзя решить непосредственно, но на основании принципа максимального правдоподобия можно найти совокупность значений, которая с наибольшей вероятностью удовлетворяла бы исходным зависимостям.

В качестве недостатков такого подхода можно отметить, что, если погрешности измерения сигналов на выходах датчиков, распределены не по нормальному закону, из теории МНК следует, что полученные оценки не будут эффективными в статистическом смысле, а метод требуется модифицировать.

Данная работа посвящена повышению точности измерения параметров с помощью многозондового микроволнового мультиметра путём оптимизации моделей в соответствии с методом наименьших квадратов, только не в классической гауссовской разновидности, а методом фильтра Калмана [2], который был применен впервые и отличается от классического метода наименьших квадратов использованием априорной информации.

**Целью** статьи является исследование применимости метода фильтрации Калмана в несвойственной для него области, относящейся к радиоизмерениям и сопоставление точностей обеспечиваемых этим методом и альтернативными.

### Основная часть

Источником априорной информации является решение системы линейных уравнений для трех датчиков, решение которой в отношении трех промежуточных переменных получены методами линейной алгебры.

$$P = A b, \quad (1)$$

где  $A = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix}$  – матрица системы уравнений;

$\theta$  – фазовое расстояние между соседними датчиками;

$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$  – матрица промежуточных переменных;

$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$  – матрица сигналов датчиков.

Решение системы (1) для трех промежуточных переменных  $b$  получены методами линейной алгебры

$$b = A^{-1} P, \quad (2)$$

$$\text{где } b = \begin{bmatrix} \frac{-P_1 + 2P_2 \cos \theta - P_3}{2(\cos \theta - 1)} \\ \frac{P_1 - 2P_2 + P_3}{2(\cos \theta - 1)} \\ \frac{P_1 - P_3}{2 \sin \theta} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

промежуточные переменные вычислили как в [5, 6].

Через промежуточные переменные определяем, например, проходящую мощность, пользуясь ее определением [7]:

$$P_{\text{пр}} = \sqrt{b_1^2 - b_2^2 - b_3^2}. \quad (4)$$

Аналогичные выражения могут быть и для модуля и фазы комплексного коэффициента отражения.

Анализ данного алгоритма 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. Таким образом, получим избыточную систему уравнений, которую решают по алгоритму рис. 2.

Предлагаем такой алгоритм обработки избыточной системы датчиков [6, 8]:

$$y = b + \left( M^{-1} + A1^T R^{-1} A1 \right)^{-1} A1^T R^{-1} (p - A1 b), \quad (5)$$

где  $b$  – начальное приближение  $y$  из выражения (3);

$A1$  – матрица системы уравнений с четырьмя эквидистантными датчиками – матрица системы уравнений и она равна

$$A1 = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 1 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta \end{bmatrix}; \quad (6)$$

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

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$M$  – априорная ковариация ошибок решения, находится как погрешность косвенных измерений, которая получается из выражения (3). С целью упрощения пока не учитывается корреляция между промежуточными переменными.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 \cos^2 \theta + \sigma_3^2}{(2(\cos \theta - 1))^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 + \sigma_3^2}{(2(\cos \theta - 1))^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}{(2 \sin \theta)} \end{bmatrix}. \quad (8)$$



Рис. 2. Структурная схема алгоритма с применением фильтра Калмана

Проведение моделирования необходимо для проверки работоспособности алгоритма, когда сигналы датчиков не идеальные, а реальные с шумами. Моделирование заключается в добавлении в сигналы датчиков случайных погрешностей. Причем следует обратить внимание на равенство нулю математического ожидания этой погрешности, то есть в сумме шумы должны взаимно компенсироваться. Что касается закона распределения вероятностей для погрешностей датчиков, то в отличие от метода наименьших квадратов, оно не обязательно должно быть нормальным. Набираем массив данных путем расчетов вместо измерений. По произвольно взятым значениям модуля и фазы комплексного коэффициента отражения нагрузки определяем значения сигналов датчиков. Получаем вместо сигналов датчиков их расчетные значения. И проводим все операции, которым подвергались бы при обработке сигналы датчиков, будь они получены измерением. Результаты моделирования для четырех датчиков для двух коэффициентов отражения 0,2 и 0,5 представлены на рис. 3, а, б. Фаза коэффициента отражения предполагается равной 0. Мощность генератора условно считаем единичной.

Что касается погрешности измерения мощности, здесь используется определение проходящей мощности как  $P_{пр} = P_{пад}(1 - \Gamma^2)$ , где  $\Gamma$  – модуль комплексного коэффициента отражения и определение относительной погрешности.

На графиках по оси абсцисс отложены фазовые расстояния между датчиками, причем крайнее левое значение соответствует фазовому расстоянию между соседними датчиками  $90^\circ$  или  $\pi/2$  радиан, а крайнее правое значение на оси абсцисс соответствует фазовому расстоянию между соседними датчиками  $120^\circ$  или  $2\pi/3$  радиан.

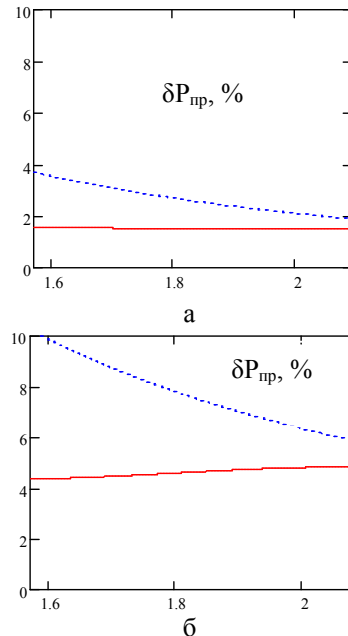


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности определения проходящей мощности от фазового расстояния между датчиками: а – фазовое расстояние между соседними датчиками  $\theta$ , радианы,  $\Gamma=0,2$ ; б – фазовое расстояние между соседними датчиками  $\theta$ , радианы,  $\Gamma=0,5$

$90^\circ$  и  $120^\circ$  являются традиционными для эквидистантного размещения датчиков, и до сих пор нет окончательного единого мнения относительно оптимальности того или иного размещения. По оси ординат отложены относительные погрешности определения проходящей мощности, выраженные в процентах. Первый график (рис. 3, а) приведен для слабо рассогласованной передающей линии (коэффициент отражения  $\Gamma=0,2$ ), а второй график (рис. 3, б) для сильного рассогласования (коэффициент отражения  $\Gamma=0,5$ ). На обоих рисунках пунктирный

график соответствует простому алгоритму обработки на основе линейной алгебры, а сплошной график алгоритму с применением метода одношаговой фильтрации Калмана.

Моделирование показало, что, во-первых, погрешность алгоритма обработки сигналов датчиков в многозондовом микроволновом мультиметре с применением алгоритма одношаговой фильтрации Калмана позволяет уменьшить погрешность в 2 и более раза по сравнению с алгоритмом, основанным на простом решении системы линейных алгебраических уравнений.

Во-вторых, относительные погрешности искомых параметров, в частности, проходящей мощности, при расчете предлагаемым методом фильтрации Калмана оказались парадоксальным образом меньше относительных погрешностей сигналов самих датчиков, что можно объяснить формой представления погрешности при моделировании: погрешность задавалась в виде СКО, затем в сигналы датчиков добавлялась случайная погрешность в абсолютном представлении как среднее квадратическое отклонение (СКО), умноженное на доверительный коэффициент, равный 1,6. При переходе от абсолютной погрешности датчика к относительной путем деления на конкретное значение мощности, особенно для больших амплитуд стоячей волны (в сильно рассогласованном тракте), относительная погрешность именно сигнала датчика приобрела большие значения.

В-третьих, наблюдается частичное совпадение результатов с общеизвестными, а именно меньше погрешность для размещения с фазовым расстоянием между соседними датчиками  $120^\circ$  (в крайней правой точке на оси абсцисс), чем при прочих расстояниях между соседними датчиками.

В-четвертых, разные фазовые расстояния на оси  $x$  можно интерпретировать как изменение частоты генератора и сделать вывод о стабильности работы алгоритма с фильтрацией в диапазоне частот, что обеспечивает универсальность и тоже является достоинством.

## Выводы

Перспективы исследований такие. Поскольку расчеты производились без учета корреляции, полу-

чаются несколько завышенные значения погрешностей, значит, следует в дальнейшем корреляцию учесть. Кроме того, задаваясь уровнем требуемой точности, можно добавлять датчики и их уравнения в математическую модель, пока не будет достигнут желаемый уровень точности, тем самым оптимизируя количество датчиков.

## Список литературы

1. Teppati V. *Modern RF and microwave measurement technique [Text]* / V. Teppati, A. Ferrero, M. Sayed. – Cambridge University Press, 2013. – 447p.
2. Данилин А.А. *Измерения в технике СВЧ: Учеб. пособие для вузов [Текст]* / А.А. Данилин. – М.: Радиотехника, 2008. – 184 с.
3. Механиков А.И. *Микроволновый мультиметр и алгоритмы его работы [Текст]* / А.И. Механиков // *Измерительная техника*. – 1994. – №3. – С. 52-56.
4. Волков В.М. *Погрешности многозондовых микроволновых мультиметров с эквидистантными датчиками* / В.М. Волков, О.Б. Зайченко // *Український метрологічний журнал*. – 2008. – №4. – С. 26-28.
5. Львов А.А. *Измерение параметров СВЧ двухплоскостных методом многозондовой измерительной линии [Текст]* / А.А. Львов, А.А. Моржаков, С.И. Ширшин, А.В. Жуков, Ю.Ю. Кудряшов // *Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ*. – 1987. – Вып. 7(401). – С. 48-51.
6. Львов П.А. *Разработка методов, алгоритмов и программ для СВЧ-преобразователей информации в системах управления техническими объектами [Текст]: автореф. дис.канд.техн.наук, 05.13.05 / П.А. Львов; [ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет»]. – Саратов, 2011. – 16 с.*
7. Сейдж Э. *Теория оценивания и ее применение в связи и управлении [Текст]* / Э. Сейдж, Дж. Мелс; Под ред. проф. Б.Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
8. Сизиков В.С. *Устойчивые методы обработки результатов измерений. Учебное пособие [Текст]* / В.С. Сизиков. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 240 с.
9. Kotukh V.G. *Application of software complex for query processing in the database management system with a view of dispatching problem solving in Grid systems* / V.G. Kotukh, M.A. Miroshnik, S.N. Selevko // *Telecommunications and radio engineering*. – 2013. – Vol. 27. – № 10. – С. 875-891.

Поступила в редакцию 30.08.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Синотин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРА КАЛМАНА В БАГАТОЗОНДОВОМУ МІКРОХВИЛЬОВОМУ МУЛЬТИМЕТРІ

М.А. Мірошник, О.Б. Зайченко

*Дана стаття присвячена дослідженню застосовності методу фільтрації Калмана у невластивій для нього області, що відноситься до галузі радіовимірювань і зіставленню точностей, забезпечуваних цим методом і альтернативними.*

**Ключові слова:** багатозондовий мікрохвильовий мультиметр, аналізатор кіл НВЧ, алгоритм обробки сигналів датчиків, закон розподілу похибки, шуми, метод найменших квадратів, фільтр Калмана.

## KALMAN FILTER USE IN MICROWAVE MULTIPROBE MULTIMETER

M.A. Miroshnik, O.B. Zaichenko

*This paper focuses on the study of the applicability of the method of Kalman filtering in improper for it field that relates to RF measurement and comparing the accuracy of this method and another ones.*

**Keywords:** multiprobe microwave multimeter, microwave network analyzer, signal processing sensors, the law of error distribution, noise, method of least squares, Kalman filter.