

УДК 621.317

ОМАРОВ М.А., д.т.н., профессор (ХНУРЭ),
 ЦЕХМИСТРО И.И., к.ф.н., доцент (НТУ «ХПИ»),
 ЗАЙЧЕНКО О.Б., ассистент (ХНУРЭ)

Структурное моделирование многозондового микроволнового мультиметра на основании итерационных алгоритмов

В статье промоделирована зависимость величины погрешности от количества и взаимного влияния зондов при обработке сигналов датчиков итерационными алгоритмами фильтрации Калмана и Роббинса-Монро. Показано преимущество компьютеризированных математических итерационных алгоритмов перед аналитическим анализом с использованием ориентированных графов построенных по правилу Мезона. При малом количестве зондов показано хорошее совпадение результатов.

Ключевые слова: структурная модель, фильтр Калмана, процедура Роббинса-Монро, математическая модель.

Введение

Техника сверхвысоких частот – это определяющий фактор технического потенциала страны. Именно поэтому она является приоритетным направлением исследований. В технике СВЧ важную роль играют измерения. Данное исследование посвящено повышению точности многозондовых мультиметров, предназначенных для измерения параметров СВЧ сигналов и трактов. Несмотря на то, что многозондовый метод известен достаточно давно, имеет ряд подвидов, например, двенадцатиполусные рефлектометры, единого оптимального алгоритма и структуры до сих пор не существует. Цель исследования сосредоточена на двух моментах. Во-первых, средствами имитационного моделирования представить СВЧ блок мультиметра с произвольным количеством датчиков с переотражениями между датчиками. Во-вторых, промоделировать обработку сигналов датчиков, содержащих случайные погрешности, обработка заключается в использовании

таких итерационных алгоритмов как фильтр Калмана и стохастическая аппроксимация Роббинса-Монро.

Моделирование переотражений между датчиками

СВЧ блок мультиметра представляет собой отрезок волновода с вмонтированными в него датчиками.

С точки зрения уменьшения погрешности рассогласования целесообразно расстояние между соседними датчиками выбирать меньше длины волны. Анализ этой модели показал, что при таком расстоянии между соседними датчиками, они наводят друг на друга ЭДС. Учет переотражения сигналов между соседними датчиками приводит к повышению адекватности модели физическим процессам в волноводе.

Математическую модель СВЧ блока традиционно представляют ориентированным графом.

На рис. 1 изображен ориентированный граф СВЧ блока многозондового микроволнового мультиметра с тремя датчиками.

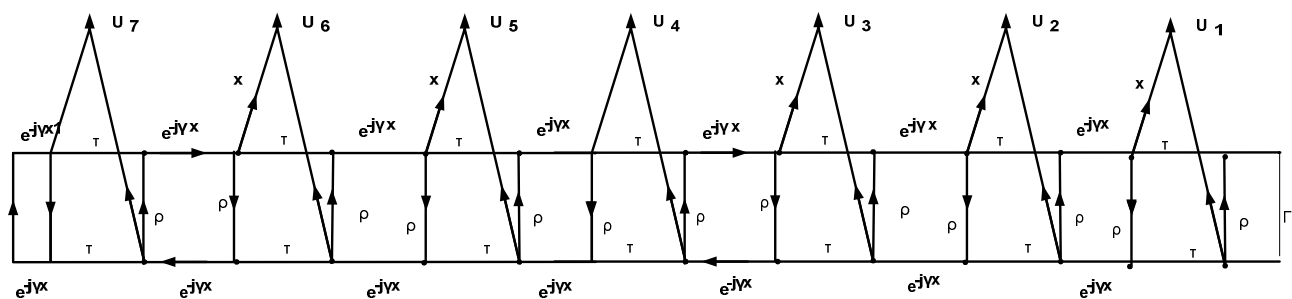


Рис. 1. Ориентированный граф СВЧ блока с 7 датчиками с учетом переотражений:
 ρ - собственный коэффициент отражения датчика, Γ - коэффициент отражения нагрузки

Как известно теория ориентированных графов позволяет рассчитать передачу со входа на выход устройства, пользуясь правилом некасающихся контуров (правилом Мезона). Например, для пяти датчиков уравнение сигнала датчика уже достаточно громоздкое

$$\frac{E_1}{E_n} = \frac{1}{\tau^5} e^{j\beta l_n} \left\{ (1 - \Gamma_n \rho e^{-j\beta l_n}) (1 - j\tau\rho - \tau^3\rho + \tau^4\rho) + e^{-j\beta l_n} \tau^7 \Gamma_n [\tau(\tau - \rho) - 3\rho^2] + j e^{-j2\beta l_n} \tau^2 \Gamma_n (\rho - j\rho\tau^2 - \tau^4\rho - j\tau\rho^2 - 2\tau^3\rho^2) - j\tau^4\rho^2 (2 - j\tau^2) + 4j\rho^2 + 3\tau^2\rho^2 \right\} \quad (1)$$

где τ – коэффициент передачи, ρ – собственный коэффициент отражения датчика, Γ_n – коэффициент отражения нагрузки, $\frac{E_1}{E_n}$ – нормированное напряжение на датчике, β – коэффициент распространения, l_n – расстояние до нагрузки.

Однако, при количестве датчиков более 5, аналитически учесть переотражения не представляется возможным из-за громоздкости. Поэтому разработка моделей и методов автоматического учета переотражений при числе датчиков более 5 особенно актуальна.

При аналитическом расчете по правилу Мезона, который учитывает взаимное влияние, увеличение количество зондов приводит к усложнению выражения (1). Например, при 7 датчиках указанное выражение дополнится двумя слагаемым при экспонентах и при этом каждое добавленное слагаемое имеет большее количество собственных слагаемых.

Нами был использован Matlab Simulink для создания модели СВЧ блока с 8 датчиками (рис. 2). Данный программный продукт без громоздких аналитических выкладок автоматически позволяет рассматривать микроволновый блок с вдвое и втрое большим числом зондов, т.е. практически сразу перейти к анализу значений погрешностей. А анализ по правилу Мезона сначала подразумевает построение ориентированного графа. При этом каждое добавленное слагаемое имеет большее количество собственных слагаемых. Затем вывод соотношения подобного (1) и лишь потом - проведение численного анализа с помощью автоматизированной системы, например MATCAD.

Модель (рис. 2) позволяет рассчитывать сигналы датчиков с учетом переотражений сигналов между зондами. Полученные при имитационном моделировании значения совпадают с рассчитанными аналитически, что позволяет заменить аналитические расчеты имитационным моделированием для количества датчиков более трех.

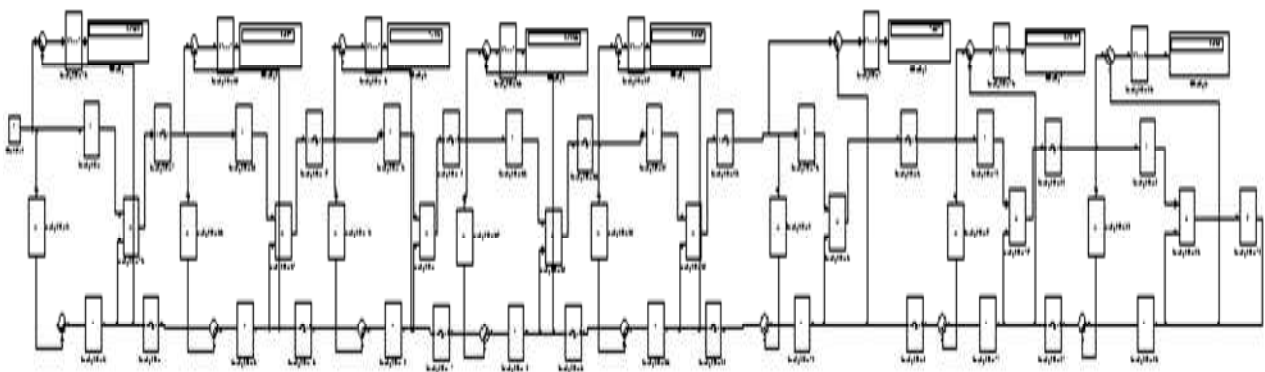


Рис. 2. СВЧ блок с 8 датчиками в Matlab Simulink

Моделирование работы итерационного алгоритма мультиметра

Полученные на предыдущем шаге рекурсивной процедуры значения сигналов датчиков уже содержат информацию об искомым параметрах мощности и коэффициента отражения, но чтобы извлечь эту информацию сигналы датчиков подвергают обработке, как в косвенных измерениях.

Модель СВЧ блока - это система линеаризованных уравнений, аналогичных [3, 4]. Причем количество

уравнений больше, чем количество неизвестных, то есть используется избыточная информация.

Среди методов обработки сосредоточим свое внимание на итерационных методах и методах с использованием избыточной информации. А именно сравним между собой фильтр Калмана и процедуру Роббинса-Монро.

Рекурсивная процедура Роббинса-Монро на $k + 1$ шаге представляется в виде

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + K(k) \left[y(k) - H(k) \hat{x}(k) \right], \quad (2)$$

где $y(k) = H(k)x(k) + \xi(k)$ - уравнение наблюдения, формирующее наблюдаемую статистику, $K(k)$ - коэффициент, обеспечивающий сходимость процедуры (2).

На рис. 3 представлена структурная схема процедуры, которая представлена соотношением (2).

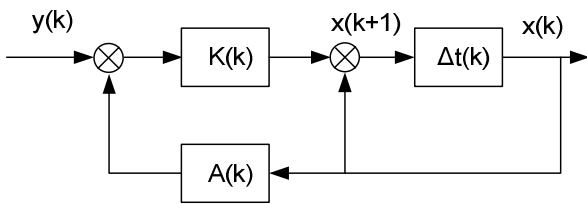


Рис. 3. Структурная схема дискретного алгоритма Роббинса-Монро

Физический смысл структурной схемы такой. На вход поступают сигналы датчиков. На выходе формируются промежуточные переменные. С выхода промежуточные переменные сохраняются в блоке задержки, и одновременно умножаясь на $H(k)$, становятся сигналом датчика. Этот рассчитанный сигнал и сигнал, только что измеренный, складываются в левом сумматоре. Полученная разность умножается на коэффициент усиления $K(k)$. Произведение добавляется к измеренному сигналу. Так получается уточнения оценки. Одновременно она сохраняется для следующего шага и выдается с выхода. Процесс носит итерационный характер.

Обработка сигнала в многозондовом микроволновом мультиметре базируется на физической модели. Она представлена на рис. 4. Согласно этой модели происходит восстановление картины стоячей волны в тракте при помощи сигналов дискретных датчиков в процессе измерения. На рисунке датчики показаны в виде диодов, которые являются наиболее распространенным, но не единственным видом датчиков, используемых для этих целей. От физической модели переходят к модели структурной в виде ориентированного графа.

Используется каскадное соединение графов отдельных датчиков. Правило Мезона для некасающихся контуров позволяет описать аналитически сигналы каждого датчика и СВЧ блока в целом. Обработка сигналов датчиков включает фильтрацию случайных погрешностей и аналогична рис. 3. В верхней части рисунка схематически приведена структурная схема фильтрации. Поочередное подключение датчиков с помощью коммутатора позволяет уточнять оценку на каждом

последующем шаге. Матрица A – матрица системы уравнений, соответствующих сигналам датчиков [3, 4].

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos(k\theta) & \sin(k\theta) \end{bmatrix} - \text{матрица коэффициентов}$$

системы уравнений,

$\Delta t(k)$ – предыдущее значение искомым параметров.

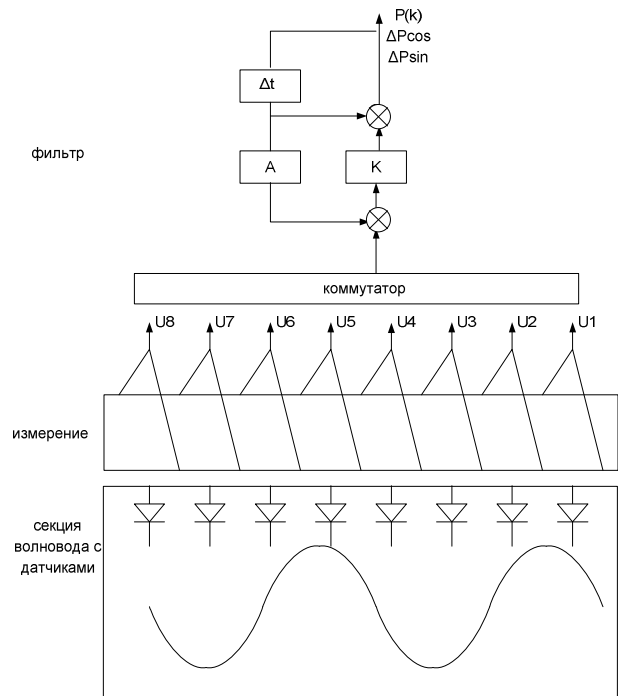


Рис. 4. Модель обработки сигнала в многозондовом микроволновом мультиметре:

Δt - хранение предыдущих значений искомым переменных, K – коэффициент усиления

На рис. 4 показана преимущество модели и измерения. Если сравнить коэффициент усиления для двух различных рекурсивных процедур, а именно фильтра Калмана и процедуры Роббинса-Монро, то в последнем случае объем вычислений меньше, что более привлекательно для инженерных расчетов.

Коэффициент, обеспечивающий сходимость процедуры Роббинса-Монро $K(k)$, пропорционален в одномерном случае членам гармонического ряда, то есть $1, 1/2, 1/3, 1/4, \dots$

Как только от одномерной процедуры Роббинса-Монро переходят к многомерной, как в нашем случае, возникают проблемы с коэффициентом, обеспечивающим сходимость процедуры $K(k)$. Ключевым моментом является то, что в многомерном случае у каждого элемента вектора уточняемых параметров свой коэффициент, обеспечивающий

сходимость $K_i(k)$, они могут быть равны, а могут и отличаться. Уменьшение значения коэффициента происходит, если значение разности в скобках выражения (2), т. е. невязка на предыдущем и текущем шаге итерации, имеет разные знаки.

Схема, представленная на рис. 5, базируется на рис. 3, но в то же время акцентирует внимание на

ключевом моменте анализа знака невязки на текущем и предыдущем шаге, на основе чего принимается решение о том, с каким весовым коэффициентом добавится (или вычтется) значение невязки к предыдущим значениям параметров. Такое представление обладает высокой степенью готовности к аппаратной реализации.

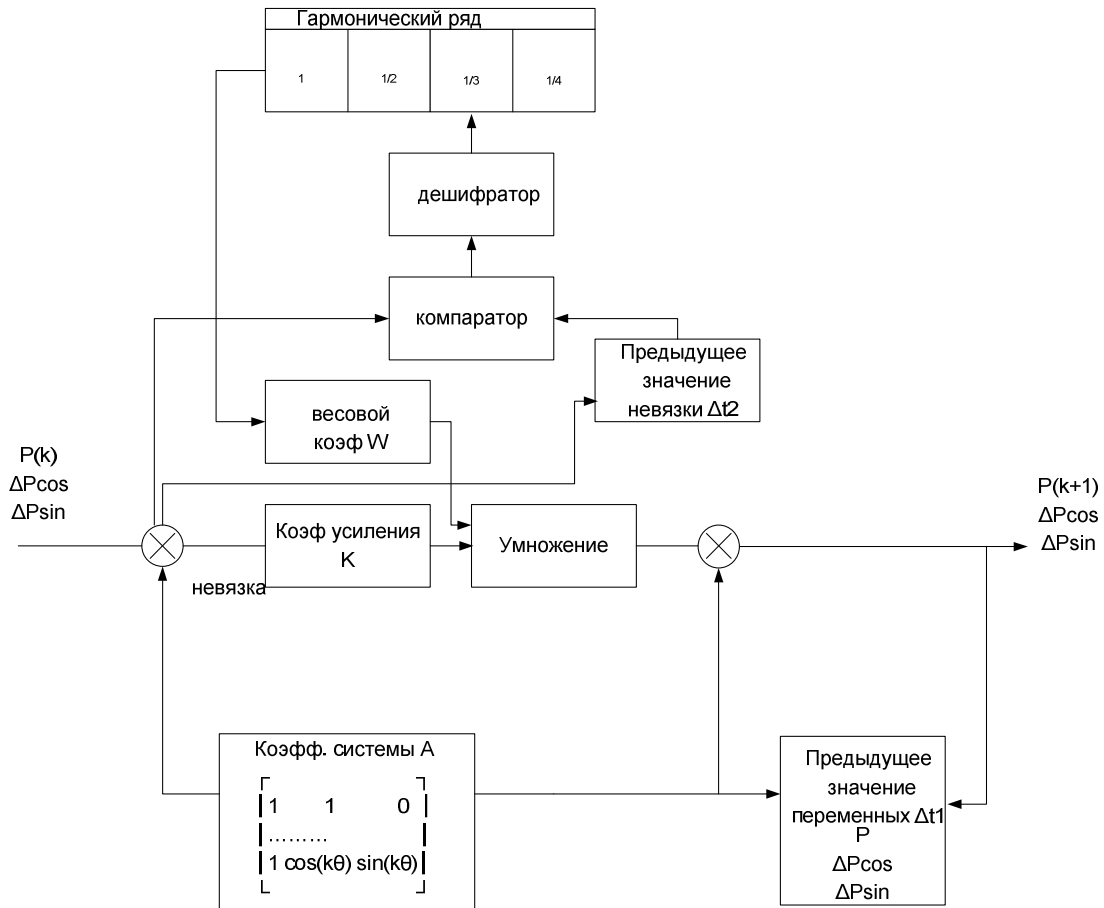


Рис. 5. Схема применения процедуры Роббинса-Монро

Рассмотрим пример. Пусть 8 датчиков расположены на расстоянии $\lambda_B / 6$ при таких параметрах нагрузки: модуль коэффициента отражения 0,8 и фаза коэффициента отражения 40° . С учетом переотражений между датчиками их сигналы имеют значения 2,057; 0,1041; 1,371; 2,069; 0,1255; 1,423; 2,091; 0,1572. Кроме того в сигнал каждого датчика добавлены случайные погрешности. Пусть в процессе измерений сигналы датчиков не изменяются. Используя алгоритм для идеализированных датчиков к реальным датчикам, получается относительная погрешность почти 20%. Такой алгоритм обладает неудовлетворительной точностью, но его можно принять за первое приближение. Рекурсивные

алгоритмы позволяют повысить точность. Добавляем четвертый датчик, рассчитываем невязку, присваиваем значения $1/k$ по каждой из трех промежуточных переменных одинаковые 1; 1; 1. Погрешность уменьшена недостаточно.

Увеличиваем количество датчиков до пяти. Анализируем вектор невязки. Он имеет три элемента. По сравнению с четырьмя датчиками знак поменял второй элемент, значит, $1/k$ стали 1; 1/2; 1. Добавляем еще один датчик и т.д. Результат моделирования, приведенные в табл.1 и на рис.4, свидетельствуют об эффективности процедуры Роббинса-Монро с переменным шагом.

Таблиця 1

Сравнение значений проходящей мощности, полученных с помощью обработки сигналов датчиков по алгоритмам фильтрации Калмана и процедуре стохастической аппроксимации Роббинса-Монро

| К-во датчиков | Относительная погрешность, % | | | |
|---------------|------------------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| | ФК* без переотраж. | ФК с переотраж. | РМ без переотраж. | РМ переотраж. |
| 3 | 4,7 | 27 | 8 | 23,3 |
| 4 | 6,9 | 29 | 13 | 24,2 |
| 5 | 10 | 15 | 16 | 13,3 |
| 6 | 4,7 | 24 | 8,3 | 6,7 |
| 7 | 15 | 9,1 | 7,7 | 6,1 |
| 8 | 9,1 | 4,7 | 4,7 | 0,2 |

*ФК – фильтр Калмана, РМ – процедура Роббинса-Монро

Процедура Роббинса-Монро используется для случайных величин. Фильтр Калмана является аналогом процедуры Роббинса-Монро для случайных процессов. Их сопоставление интересно с точки зрения выбора и рекомендации к реализации наиболее эффективных способов обработки сигналов датчиков. При этом исходные данные помимо случайных погрешностей учитывают переотражения между соседними датчиками как в работах [3, 4].

На рис. 6 показано, что первая итерация при данных с учетом переотражений далека от истинного значения, но, тем не менее, сходится к нему через пять итераций. Также из анализа рисунка следует колебательный характер приближений вокруг истинного значения. Путем оптимального выбора коэффициента усиления амплитуду этих колебаний можно уменьшить.

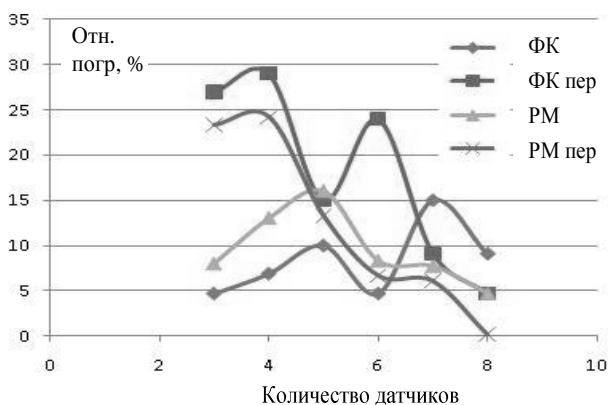


Рис. 6. Сравнение различных алгоритмов обработки сигналов датчиков

Выводы

Имитационное компьютерное моделирование взаимного влияния переотражения сигналов зондов проще, чем аналитический анализ. Количество датчиков при моделировании может быть гораздо большим, чем при аналитическом расчете.

Анализ фильтрации случайных погрешностей показал, что в данном случае значение проходящей мощности ближе всего за пять итераций к истинному значению, которое определено согласно [7]. Результат, полученный методом Роббинса-Монро, составил 0,2 % для относительной погрешности. Для случая с учетом переотражений между зондами первая итерация дальше от истинного значения, чем для случая без переотражений при использовании процедуры

При нечетном количестве датчиков (пять и семь датчиков) процедура Роббинса-Монро дает менее точный результат, чем при четном количестве датчиков. Оценка погрешности по алгоритму Роббинса-Монро программно проще в реализации, чем метод Калмана.

Литература

1. Уайльд Д. Методы поиска экстремума. – М.Наука, 1967. – 269 с.
2. Волков, В.М. О погрешности зондовых ваттметров проходящей мощности СВЧ, обусловленной отражениями от датчиков [Текст] / В.М. Волков, Л.М. Коротун, В.Д. Кукуш // Радиотехника, республ. межвед. темат. науч.-техн.сб., 1972, вып. – с. 120 – 125.
3. Klychnyk I.I., Miroshnik M.A., Tsekhmistro R.I., Warsza Z.L., Zaichenko O.B. Modelling of influences of sensor reflections on the accuracy of a microwave reflectometer // Pomiaru, automatyka, kontrola, vol.60,nr4/2014. – P.223 – 227.
4. Зайченко О.Б., Ключник И.И., Мирошник М.А., Цехмистро Р.И. Сравнительный анализ погрешности многозондовых микроволновых мультиметров с обработкой методами фильтра Калмана и наименьших квадратов, учитывающий переотражения зондов. // Радиотехника. Всеукр.межвед.научн.-техн.сб. – 2014. – вып.176. – С. 247–252.
5. Гулятьев А. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 1999. – 288 с.
6. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ. – М. Радиотехника, 2008. – 184 с.
7. Измерение мощности на СВЧ / Билько М.И., Томашевский А.К. – М.: Радио и связь, 1976. – 276 с.

Омаров М.А., Цехмістро І.І., Зайченко О.Б.
Структурне моделювання багатозондових мікрохвильових мультиметрів на основі ітераційних алгоритмів. У статті промодельована залежність величини похибки від кількості зондів та їх взаємного впливу при обробці сигналів датчиків ітераційними алгоритмами фільтрації Калмана і Робінса-Монро. Показано переваги комп'ютеризованих ітераційних алгоритмів порівняно з аналітичним аналізом з використанням орієнтованих графів побудованих за правилом Мезона. При малій кількості зондів показано добрий збіг результатів.

Ключові слова: структурна модель, фільтр Калмана, процедура Робінса-Монро.

Omarov M.A., Tsehmistro I.I., Zaichenko O.B.
Structural modeling of multiple probe microwave multimeter based on iterative algorithm. The dependence of error value on the probe number and their interaction during sensor signal processing by means of iterative Kalman and Robbins-Monro filtering algorithms has been simulated in the article. The advantage of computerized iterative algorithms over the analytical analysis using oriented graphs constructed according to the Mason's rule has been shown. A good agreement of results under the conditions of a small number of probes has been shown.

Key words: structural model, the Kalman filter, the Robbins-Monro procedure, mathematical model.

Рецензент д. ф.-м. н., професор Синотин А.М.
(Харьковский национальный университет радиоэлектроники)

Поступила 08.10.2014г.