

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ МНОГОЗОНДОВОГО МИКРОВОЛНОВОГО МУЛЬТИМЕРА

Д.т.н. М.А. Мирошник<sup>1</sup>, О.Б. Зайченко<sup>2</sup>

1. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков

2. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*В работе рассматриваются методы измерения параметров СВЧ сигналов и трактов многозондовым методом, математической моделью которого служит система линеаризованных уравнений, количество которых больше чем неизвестных, то есть система уравнений избыточная. Задачей данного исследования является выявление метода наиболее эффективного с точки зрения точности и сходимости в данных конкретных условиях. Особенности применения итерационных методов в алгоритмах микроволновых многозондовых мультиметров состоят в том, что дискретизация производится в пространстве, где отсчеты датчиков используются вместо дискрет по времени и датчики можно конструктивно разместить как эквидистантно, так и неэквидистантно.*

*У роботі розглядаються методи виміювання параметрів НВЧ сигналів і трактів багатозондовим методом, математичною моделлю котрого служить система линеаризованих рівнянь, кількість яких більше ніж невідомих, тобто система рівнянь надлишкова. Завданням даного дослідження є виявлення методу найбільш ефективного з точки зору точності та збіжності в даних конкретних умовах. Особливості застосування ітераційних методів в алгоритмах мікрохвильових багатозондових мультиметрів полягають у тому, що дискретизація проводиться в просторі, де відліки датчиків використовуються замість дискрет за часом і датчики можна конструктивно розмістити як еквідистантно, так і нееквідистантно.*

*The methods of measurement of microwave signals and tracts parameters by multiprobe method which model is linearized equation system, number of equation is more than number of unknown, i.e. system is overdetermined was considered in the article. The task of the research is to find the most efficient method from point of view of given condition. The features of use of iterative method in the multiprobe microwave multimeter is in spatial discretization when sensor readings are used instead of time discreization. The sensors can be constructively accommodate both equidistant and non-equidistance.*

**Ключевые слова:** итерационный алгоритм, верификация, многозондовый микроволновый мультиметр, фильтрация оценок, стохастическая аппроксимация, метод максимального правдоподобия.

## Введение

Измерение параметров СВЧ сигналов и трактов многозондовым методом предполагает обработку сигналов нескольких датчиков, расположенных вдоль направления переноса энергии в волноводе. Поскольку сигналы реальных датчиков в отличие от их идеализированных моделей обладают случайными

погрешностями, то точность измерений напрямую зависит от того насколько в процессе обработки случайные погрешности могут быть уменьшены. Математической моделью многозондового метода служит система линеаризованных уравнений. Причем количество уравнений больше чем количество неизвестных, то есть система уравнений избыточная. Для математического описания и решения аналогичных систем в теории оценивания широко используются итерационные методы, а именно метод максимального правдоподобия, метод фильтрации Калмана и метод стохастической аппроксимации Роббинса-Монро. Задачей данного исследования является выявление метода наиболее эффективного с точки зрения точности и сходимости в данных конкретных условиях. Особенности применения итерационных методов в алгоритмах микроволновых многозондовых мультиметров состоят в том, что дискретизация, в отличие от традиционной дискретизации по времени, заменена дискретизацией в пространстве, где отсчеты датчиков используются вместо дискрет по времени. В пространственной дискретизации положительно, то, что датчики можно конструктивно разместить как эквидистантно, так и неэквидистантно, но есть и недостатки – количество датчиков физически ограничено восемью штуками, поэтому речь идет о малой выборке [1].

С помощью многозондового микроволнового мультиметра производят измерения мощности и комплексного коэффициента отражения нагрузки. В зарубежных источниках такие приборы называют двенадцатиполусными рефлектометрами [2]. Двенадцатиполусные рефлектометры возникли как альтернатива более дорогим векторным анализаторам цепей, использующим гетеродинный принцип понижения сверхвысоких частот. Скалярные анализаторы цепей, такие как двенадцатиполусные рефлектометры, извлекают векторную информацию об амплитуде и фазе сигнала из чисто скалярных сигналов датчиков и в этом их преимущество. Для извлечения информации используется, в частности, графическое представление сигналов датчиков окружностями на плоскости комплексного коэффициента отражения. Пересечение окружностей является решением системы уравнений [2]. Такой подход предложен Энгеном и Хоуром в 70е годы прошлого века. На основании графического подхода сделан вывод об оптимальности размещения соседних датчиков с фазовым расстоянием между ними 120°. Для уменьшения влияния случайных погрешностей на точность измерений еще Энгеном [3] предложено использовать оптимальную обработку сигналов датчиков по методу максимального правдоподобия.

Наше внимание привлекли своей точностью рекурсивные методы. Современная вычислительная техника обеспечивает необходимое быстродействие, практически такое же как у прямых методов. Особенностью рекурсивных методов является уточнение результатов на каждом последующем шаге, путем учета априорной информации и текущих измерений. Повышение точности достигается ценой усложнения обработки и требует для обеспечения сходимости выбора корректных начальных значений, а также коэффициента, с которым в разных пропорциях учитываются априорная информация и текущие измерения [4-5].

**Постановка задачи**

Произвести усовершенствование итерационных алгоритмов многозондового микроволнового мультиметра, проверить работоспособность алгоритмов, внести поправки и усовершенствовать физико-математическую и метрологическую модели многозондового мультиметра.

**Итерационные алгоритмы для многозондового микроволнового мультиметра.**

СВЧ блок представляет собой отрезок волновода с установленными на нем датчиками. Внутри СВЧ блока устанавливается стоячая волна, если нагрузка рассогласована. Сигнал каждого датчика – это мгновенное значение стоячей волны в данной точке. Сигналы датчиков имеют единообразную запись. Отличие между уравнениями соседних датчиков заключается в фазовых расстояниях, которое соответствует разным аргументам косинусов в модели датчика. Путем замены переменных от тригонометрических функций впоследствии избавляются и переходят к линейной системе уравнений.

Итак, математические модели – избыточная система линейных уравнений [1]

$$A_k x_k + v_k = b_k, k = 1, 2... \tag{1}$$

где  $A_k$  – данная матрица избыточных уравнений,

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos(k\theta) & \sin(k\theta) \end{bmatrix}, \theta - \text{фазовое расстояние}$$

между соседними датчиками,  $\theta = \frac{2\pi}{\lambda_g} l$ ,  $\lambda_g$  – длина

волны в волноводе,  $l$  – геометрическое расстояние между датчиками,  $x_k$  – вектор неизвестных переменных,

$$x_k = \begin{bmatrix} P_{\text{пад}} (1 + \Gamma^2) \\ 2P_{\text{пад}} \Gamma \cos \varphi \\ 2P_{\text{пад}} \Gamma \sin \varphi \end{bmatrix}, b_k - \text{сигналы датчиков,}$$

$$b_k = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}, v_k - \text{случайный вектор с } E(v_k) = 0, k -$$

номер итерации.

Дальнейшая обработка состоит в решении этой системы уравнений. Как упоминалось ранее, решение может быть произведено графическим методом. Альтернативой этому подходу служит ряд аналитических методов [1, 6-9].

Все рекурсивные методы суть одно и то же [5]. Однако рассмотрим их подробнее и выявим связи между ними.

**Метод максимального правдоподобия**

Дисперсионная матрица обратно пропорциональна информационной матрице Фишера, которая в свою очередь получена как вторая производная функции правдоподобия в логарифмическом виде, где под функцией правдоподобия понимают плотность вероятности многомерного нормального распределения. Метод максимального правдоподобия основан на том, что функция правдоподобия имеет экстремум (максимум). Как известно, первая производная равная нулю свидетельствует о наличии экстремума, а знак второй производной позволяет различить максимум и минимум [7-8].

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + P_{k+1} A^T (b_{k+1} - A_k \hat{x}_k), \tag{2}$$

где

$$P_{k+1}^{-1} = P_k^{-1} + A_k^T A_k \tag{3}$$

-1–обращение матрицы,  $T$  – транспонирование матрицы,  $\hat{x}$  – оценка,  $P_k^{-1}$  – дисперсионная матрица,

$P_k$  – информационная матрица Фишера.

**Фильтр Калмана.**

Фильтр Калмана предназначен для рекурсивного оценивания вектора состояния априорно известной динамической системы, то есть для расчёта текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Алгоритм работает в два этапа. На этапе прогнозирования, фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. На втором этапе, по данным измерения (полученного с некоторой погрешностью) результат экстраполяции уточняется. Благодаря пошаговой природе алгоритма, он может в реальном времени отслеживать состояние объекта, используя только текущие замеры и информацию о предыдущем состоянии и его неопределенности [1].

Выражение (3) дает  $P_{k+1}^{-1}$  в то время как выражение (2) требует обратной матрицы. В связи с этим

$$P_{k+1} = P_k - P_k A_k^T (A_k P_k A_k^T + I)^{-1} A_k P_k, \tag{4}$$

где  $I$  – единичная матрица.

Отсюда

$$P_{k+1}A_k^T = P_k A_k^T (A_k P_k A_k^T + I)^{-1}, \quad (5)$$

что приводит к следующему выражению для фильтра Калмана

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + P_k A_k^T (A_k P_k A_k^T + I)^{-1} (b_{k+1} - A_k \hat{x}_k), \quad (6)$$

**Стохастическая аппроксимация**

Стохастическая аппроксимация – это метод решения класса задач статистического оценивания, в котором новое значение оценки представляет собой поправку к уже имеющейся оценке, основанную на новом наблюдении. Процедура стохастической аппроксимации рекуррентна, т. е. получение нового значения оценки возможно без запоминания старых измерений, и удобна, когда неизвестно заранее, в какой момент потребуется представление оценки – она формируется непрерывно на основании наблюдений, имеющих к данному моменту. Эти черты сближают стохастическую аппроксимацию с рекуррентными фильтрами и обуславливают популярность стохастической аппроксимации [6].

Если выражение (5) использовать рекурсивно, то получим

$$\begin{aligned} P_k A_k^T &= P_{k-1} A_k^T (A_k P_{k-1} A_k^T + I)^{-1} = \\ &= P_{k-2} A_k^T (2A_k P_{k-2} A_k^T + I)^{-1} = \\ &= P_0 A_k^T (kA_k P_0 A_k^T + I)^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

Переходя к пределу получаем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_k A_k^T = \frac{1}{k} P_0 A_k^T (A_k P_0 A_k^T)^{-1}, \quad (8)$$

Тогда выражение (6) асимптотически становится

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + \frac{1}{k+1} P_0 A_k^T (A_k P_0 A_k^T)^{-1} (b_{k+1} - A_k \hat{x}_k), \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой многомерную стохастическую аппроксимацию с весовой функцией убывающей как  $1/k$  как это принято в стохастической аппроксимации.

На основе анализа выражения (9) основное достоинство процедуры Роббинса-Монро состоит в том, что не надо каждый раз определять матрицу дисперсий так, чтобы математическое ожидание было равно нулю как это делается в фильтре Калмана. Недостаток же состоит в том, что количество датчиков не больше восьми, а это значит что условие  $k \rightarrow \infty$  не выполняется для многозондового мультиметра.

Сопоставление выражений (2), (6) и (9) позволяет сделать вывод, что за исключением коэффициентов усиления выражения идентичны, а коэффициенты усиления переходят друг в друга при определенных условиях (табл.1).

метод	максимального правдоподобия	фильтрации Калмана	стохастической аппроксимации Роббинса-Монро
коэффициент усиления	$P_{k+1} A_k^T$	$P_k A_k^T (A_k P_k A_k^T + I)^{-1}$	$\frac{1}{k} P_0 A_k^T (A_k P_0 A_k^T)^{-1}$

**Имитационное моделирование и его результаты**

Для исследования используется не только аналитические методы, но и имитационное моделирование. Имитационное моделирование в микроволновой области полезно с точки зрения обеспечения воспроизводимости условий экспериментов, позволяет выделить из целого ряда влияющих факторов наиболее существенные и обладает меньшей по сравнению с натурным экспериментом стоимостью.

При моделировании внешних воздействий, под которыми, прежде всего, подразумеваются ошибки измерения напряжений на датчиках и т.д., полагалось, что они добавляются аддитивно к полезным составляющим сигнала. При этом случайные ошибки измерений сигналов и моделировались с помощью датчиков псевдослучайных чисел с гауссовским законом распределения и заданной дисперсией  $\sigma^2$ , выбираемой так, чтобы обеспечить требуемое отношение сигнал/шум  $b_i / \sigma$  на выходах датчиков.

При выдаче результатов статистического имитационного моделирования для их последующего анализа используются зависимости элементов дисперсионной матрицы ошибок оцениваемых параметров от различных входных величин. При этом часто используются стандартные (среднеквадратические) отклонения (СКО) распределений оценок, которые дают более реальные значения максимальных отклонений от номинальных значений.

Матрицы системы уравнений строятся по фазовым расстояниям между датчиками. В ходе имитационного моделирования выявлено, что имеет смысл неэквилидистантное размещение датчиков [9], так как при эквидистантном размещении три датчика расположены симметрично на единичной окружности согласно модели Энгена [2], следовательно, четвертый датчик относительно картины стоячей волны в тракте расположен как первый и не содержит новой информации.

**Выводы**

Выявлена связь между такими рекурсивными процедурами как метод максимального правдоподобия, фильтрация Калмана и метод стохастической аппроксимации Роббинса-Монро.

Из-за малости выборки метод Роббинса-Монро не дал ожидаемых преимуществ по точности и сходимости.

Метод фильтрации Калмана показал себя наилучшим образом из всех доступных методов.

Имитационной моделирование показало целесообразность перехода к неэквидистантному размещению датчиков, что обеспечит большую информативность измерений сигналов датчиков.

Математической модели в виде рекурсивного алгоритма микроволнового многозондового мультиметра приписан физический смысл.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Klychnyk I.I., Miroschnik M.A., Tsekhmistro R.I., Warsza Z.L., Zaichenko O.B. *Modelling of influences of sensor reflections on the accuracy of a microwave reflectometer* // *Pomiary, automatyka, kontrola*, vol.60,nr4/2014. – P.223 – 227.

2. Engen G. F. *Microwave circuit Theory and fundatin Of microwave metrology* Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom First edition © 1992 Peter Peregrinus Ltd. – 256 p.

3. Engen G. F. *A least Squares Solution for Use in the Six-Port Measurement Technique.* – *IEEE Trans.* – *Vol.MTT-28.* – №12. – P. 1473 – 1477.

4. *Theory and Practice of Recursive Identification*, by L. Ljung and T. Söderström. The MIT Press Series in Signal Processing, Optimisation, and Control, edited by A.S. Willsky. Published by MIT Press, Cambridge, Mass. (1983) 528 pp.

5. Yu Chi Ho. *On the stochastic approximation method and optimal filtering theory* // *Journal of mathematical analysis and applications* 6, 1962. – p.152 – 154.

6. Вазан М. *Стохастическая аппроксимация.* – М.: «Мир». 1972. – 296 с.

7. Львов А.А., Моржаков А. А., Кудряшов Ю. Ю., Ширишин С. И. *Статистический поход к проблеме измерения параметров СВЧ-двухполюсников с помощью многополюсника* // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.* – 1989. – Вып. 8 (422). – С. 57 – 63.

8. Львов, П. А. *Разработка методов, алгоритмов и программ для СВЧ-преобразователей информации в системах управления техническими объектами: диссертация кандидата технических наук* : 05.13.05 / Львов П. А.; [Место защиты: Сарат. гос. техн. ун-т].- Саратов, 2011.- 136 с.

9. Механников А. И., Перепелкин В. А. *Микроволновый мультиметр и алгоритмы его работы* // *Измерительная техника.* – 1994. – №3. – С.52 – 56.

УДК 534.843.742

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТНОЙ СТЕРЕОФОНИИ НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ КАЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА

Д.т.н. С.М. Порошин, И.С.Беликов, Национальный технический университет «ХПИ», г.Харьков

*Авторами предложена экспериментальная методика оценки параметров громкоговорителей, с целью определения местоположения кажущегося источника звука в пространстве.*

*Авторами запропонована експериментальна методика оцінки параметрів вгучномовців, з метою визначення розташування уявного джерела звуку в просторі.*

*The authors propose an experimental technique for estimating the parameters of the loudspeakers, in order to determine the apparent location of the sound source in space.*

**Ключевые слова:** стереофония, кажущийся источник звука, стерео микрофоны.

#### Введение

Бинауральное строение человеческого слуха позволяет определять местоположение источников звука в пространстве, а также составлять в своем восприятии трехмерную картину звукового пространства. При этом точность локализации в горизонтальной плоскости составляет 3-4 градуса [1]. Это обусловлено как временной разностью сигналов, пришедших в левое и правое ухо, так и величиной амплитуды каждого из них. При прослушивании аудио стереосистемы, важным фактором является идентичность воспроизведения левого громкоговорителя (ГГ) по отношению к правому.

Уменьшение уровня воспроизводимого сигнала, как и внесение в него задержки, приводит к смещению виртуального позиционирования звука в пространстве. Высококачественные акустические стереосистемы (АС) позиционируют кажущийся источник звука (КИЗ) в центре своей стереобазы, что даёт слушателю

возможность ощутить пространственную картину аудио записи, максимально приближенную к оригиналу.

#### Задачи исследования

В данной статье представлена экспериментальная методика оценки отклонения КИЗ в зависимости от характеристик стерео громкоговорителей. Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы для корректировки местоположения КИЗ, а также для выбора оптимальной зоны прослушивания.

#### Основная часть

На данный момент, среди мультимедийных акустических систем не используется активная корректировка воспроизведения кажущегося источника звука в пространстве относительно перемещения слушателя. Технология распознавания и детектирования лица человека, позволяет использовать полученные данные о перемещении человека в пространстве для усиления интерактивности участия в формировании акустического сопровождения мультимедийного контента.

Внесение задержки во времени в один из каналов акустической системы ведёт к смещению местонахождения кажущегося источника звука в противоположную сторону. Синхронизация данных о местоположении головы слушателя и величины необходимой задержки звукового сигнала между каналами акустической системы даёт возможность управления перемещением КИЗ в реальном времени.

Данные о местоположении головы слушателя и детектирование человека в пространстве осуществляется при помощи камеры Microsoft Kinect.

Разница величины уровня воспроизводимого сигнала между каналами АС также приводит к