

УДК 621.317

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МНОГОЗОНДОВОГО МИКРОВОЛНОВОГО МУЛЬТИМЕТРА

Д.т.н. М.А. Мирошник¹, к.ф.-м.н. Р.И. Цехмистро¹, О.Б. Зайченко², к.т.н. О.Н. Замирец³

1. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков

2. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

3. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г.Харьков

В статье приведена методика и результаты моделирования алгоритмов для многозондового микроволнового мультиметра. Анализ результатов моделирования показал совпадение с теоретическими расчетами и позволил сделать вывод о работоспособности алгоритма.

У статті наведено методику і результати моделювання алгоритмів для багатозондового мікрохвильового мультиметра. Аналіз результатів моделювання показав збіг з теоретичними розрахунками і дозволив зробити висновок про працездатність алгоритму.

The article presents the methodology and results of algorithms for multiprobe microwave multimeter simulation. Analysis of simulation results show agreement with theoretical results and led to the conclusion of the algorithm reliability.

Ключевые слова: верификация, многозондовый микроволновый мультиметр, алгоритм

Введение. По сути производимые многозондовым микроволновым мультиметром измерения относятся к косвенным измерениям, поскольку искомые параметры мощности и комплексного коэффициента отражения пересчитывают из сигналов датчиков, получаемых прямыми измерениями. Для пересчета используются различные алгоритмы. Критерием оптимальности алгоритма является в первую очередь точность. Ранее [4,5] авторами этой статьи был синтезирован новый алгоритм с улучшенной точностью. Возникла задача анализа надежности этого алгоритма при различных условиях эксплуатации мультиметра.

Энергетика и энергоэффективные технологии признаны приоритетными направлениями развития Украины на ближайшее десятилетие. Для обеспечения эффективного использования энергоресурсов важен их точный учет, который осуществляется путем измерений.

Многозондовый микроволновый мультиметр предназначен для измерения параметров СВЧ сигналов и трактов. На основе результатов измерений осуществляется автоматическое подсогласование трактов, если есть в этом необходимость.

Областями применения мультиметра являются СВЧ-нагрев и сушка, телекоммуникации, радиолокация и др.

В основе работы мультиметра лежит многозондовый метод измерения параметров,

обладающий по сравнению с другими методами измерения рядом преимуществ, таких как возможность измерять фазу нагрузки, нечувствительность к внеполосным составляющим сигнала генератора и др.

Повышение точности за счет аппаратных средств на СВЧ достигло предела. Остался резерв повышения точности за счет усовершенствования моделей и учета ранее мало изученных физических явлений и связанных с ними погрешностей. Такое направление исследование принято в данной работе.

Изучение литературных источников показывает, что для анализа и синтеза многозондовых устройств использовались в основном три метода: построение аналитической модели, натурные эксперименты и имитационное моделирование. Основное внимание в нашей работе уделяется имитационному моделированию. Его достоинства наглядность, воспроизводимость условий эксперимента, отсутствие необходимости в дорогом СВЧ оборудовании в отличие от натурального эксперимента, меньшая вероятность ошибки по сравнению с аналитическими соотношениями, возможность набрать необходимую статистику. Под имитационным моделированием понимается компьютерное моделирование. Для моделирования из прикладных пакетов был выбран Matlab Simulink как наиболее универсальный и гибкий [1, 2].

Постановка задачи

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

Основная часть

Произведем декомпозицию задачи верификации алгоритмов многозондового микроволнового мультиметра на более мелкие подзадачи (рис.1). Сперва строится физико-математическая модель СВЧ-блока, представляющая собой систему линеаризованных алгебраических уравнений. Затем полученная на предыдущем этапе система линейных уравнений решается, для решения используется графический способ, что возможно благодаря Simulink. Из-за неидеальности датчиков в их сигналах присутствуют случайные погрешности, которые должны быть учтены в модели. Третий этап – фильтрация случайных погрешностей. Рассмотрим каждый из этапов подробнее.

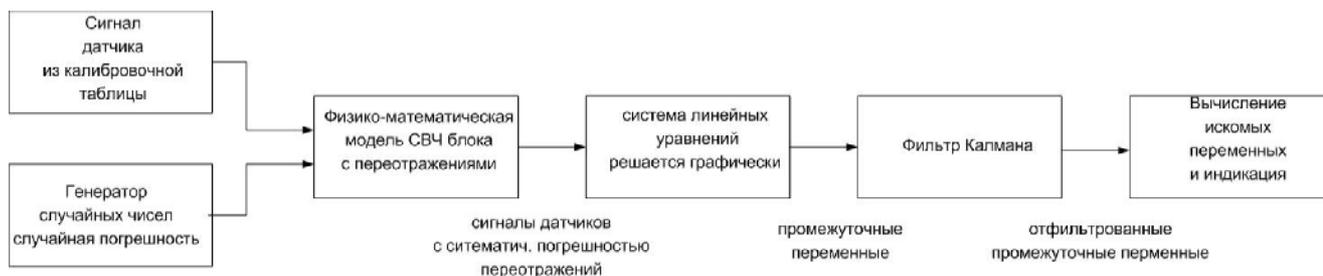


Рис.1 Поэтапная проверка алгоритма многозондового микроволнового мультиметра

Модель СВЧ блока

Распространение сигнала в рассогласованном тракте СВЧ сопровождается отражением от нагрузки. Суперпозиция падающей и отраженной волн создают стоячую волну, которая характеризуется сочетанием максимумов и минимумов, носит периодический характер. Амплитуда волны связана с коэффициентом отражения Γ таким образом, чем больше Γ , тем больше амплитуда стоячей волны в тракте. Стоячая волна приводит к диссипативным потерям, то есть нагреву стенок волновода и нерациональному использованию энергии. В определенной точке волновода присутствует сигнал, который выделяется на датчике, установленном в данной точке волновода

$$P_i = e^{-j\gamma x} + \Gamma e^{j\gamma x}, \tag{1}$$

где $\gamma = 2\pi/\lambda_B$ – коэффициент распространения,

λ_B – длина волны в волноводе. Для отраженной волны знак в показателе экспоненты меняется на противоположный, x – положение датчика вдоль направления переноса энергии по волноводу, $\gamma x = 2\pi x/\lambda_B$ – фазовое расстояние. Координата датчика

связана с выбором системы координат и началом отсчета.

Название метода «многозондовый» подразумевает наличие более одного датчика. Система датчиков представляется системой уравнений. В модели мультиметра сигналы соседних датчиков записываются единообразно, а отличаются фазовыми расстояниями. Также делается предположение об идентичности чувствительностей датчиков.

За счет присутствия показательных функций в выражении (1) система уравнений является системой трансцендентных уравнений. Чтобы была возможность ее аналитического решения систему линеаризуют, для чего вводят промежуточные переменные

$P = P_{пад} (1 + \Gamma^2), \Delta P = 2\Gamma P_{пад}$, где $P_{пад}$ – падающая мощность, Γ – коэффициент отражения нагрузки. В дальнейшем введение промежуточных переменных приводит к двухэтапному алгоритму вычисления искомых параметров. Сперва из сигналов датчиков получают промежуточные переменные, затем из промежуточных переменных вычисляют искомые.

СВЧ блок традиционно представляют ориентированным графом [6]. Анализ этой модели

показал, что при таком расстоянии между соседними датчиками, они наводят друг на друга ЭДС. Располагать датчики дальше друг от друга невозможно, так как такое размещение служит для уменьшения погрешности рассогласования, которая в измерениях на СВЧ является доминирующей. В отличие о известной модели нами учтены переотражения между соседними датчиками (рис. 2, 3). Такое усовершенствование приводит к повышению точности модели.

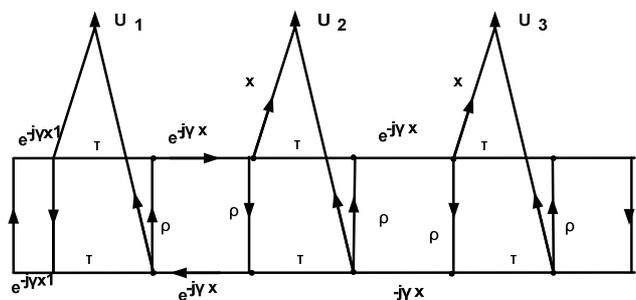


Рис.2 Направленный граф СВЧ блока с тремя датчиками с учетом переотражений

На рис.2 изображен ориентированный граф СВЧ блока многозондового микроволнового мультиметра с тремя датчиками. Здесь ρ обозначает собственный коэффициент отражения датчика, Γ обозначает коэффициент отражения нагрузки.

Для расчета сигналов датчиков U_1, U_2, U_3 используется правило Мезона для некасающихся контуров. Получаемые аналитические выражения достаточно громоздки и сложность вычислений растет с увеличением числа датчиков, как и вероятность ошибки. Увеличение числа датчиков помимо уменьшения погрешность рассогласования может потребоваться для расширения частотного диапазона мультиметра, то есть ограничить количество датчиков тремя нельзя.

На рис.3 показан СВЧ блок в Simulink. Преимуществом использования Simulink является то, что при увеличении количества датчиков, а, значит, и звеньев в ориентированном графе рис.2 производится графический расчет сигналов новых датчиков, что гораздо проще по сравнению с громоздкими аналитическими соотношениями.

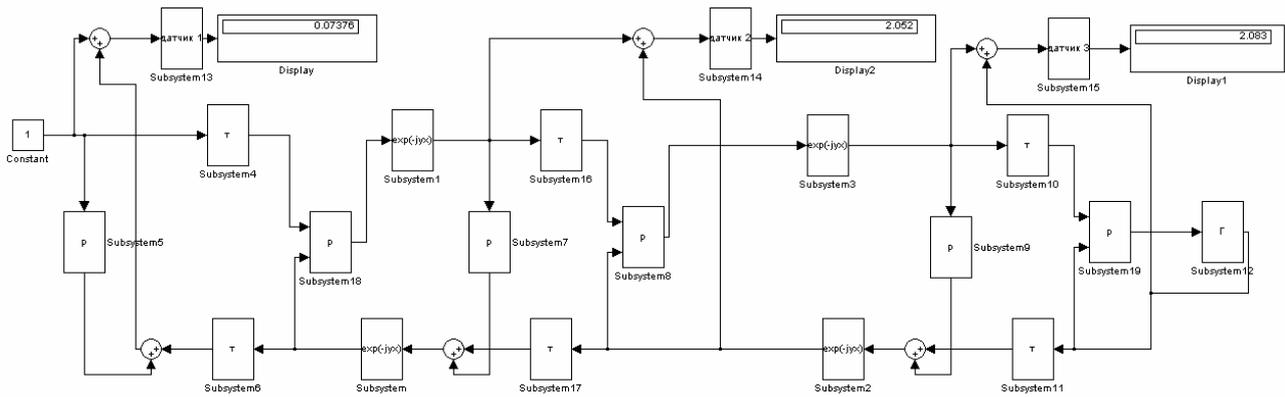


Рис.3 СВЧ блок в Simulink

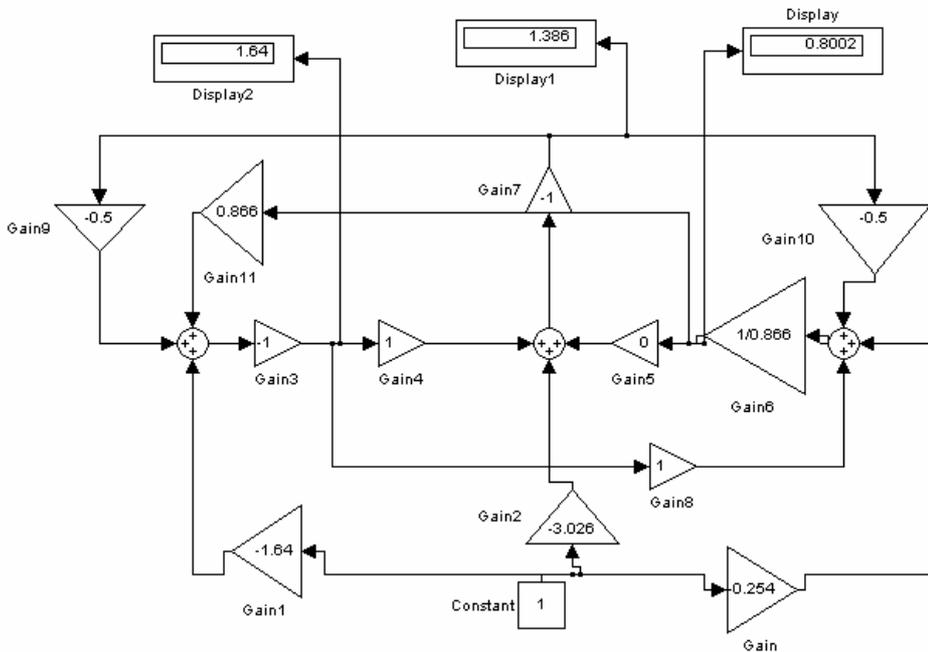


Рис.4 Решение системы уравнений графическим методом

Алгоритм обработки сигналов датчиков

Переход от сигналов датчиков к промежуточным переменным (рис.4) осуществляется тоже графически по методике [3]. Например, для модуля коэффициента отражения нагрузки $\Gamma=0,8$ фазы коэффициента отражения нагрузки $\varphi=30^\circ$ сигналы датчиков расположенных на фазовом расстоянии 120° равны 1,64; 3,026; 0,254 (из калибровочной таблицы 1) на рис.4 они показаны в нижнем ряду. А в результате расчетов (на рис.4) показаны в верхнем ряду промежуточная переменная $P=1,64$. Проверка показывает, что при исходных данных $P_{пад} = 1, \Gamma = 0,8 P = P_{пад} (1 + \Gamma^2) = 1 + 0,8^2 = 1,64$ результаты моделирования совпадают с теоретическими результатами.

Переход от промежуточных переменных к искомому осуществляется на основе определения проходящей мощности и комплексного коэффициента отражения

$$P_{прох} = P_{пад} (1 - \Gamma^2), \tag{2}$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{P_{отр}}{P_{пад}}}, \tag{3}$$

где $P_{прох}$ – проходящая мощность, $P_{пад}$ – падающая мощность, $P_{отр}$ – отраженная мощность.

Переход от промежуточных переменных к искомому величинам описан например, [4].

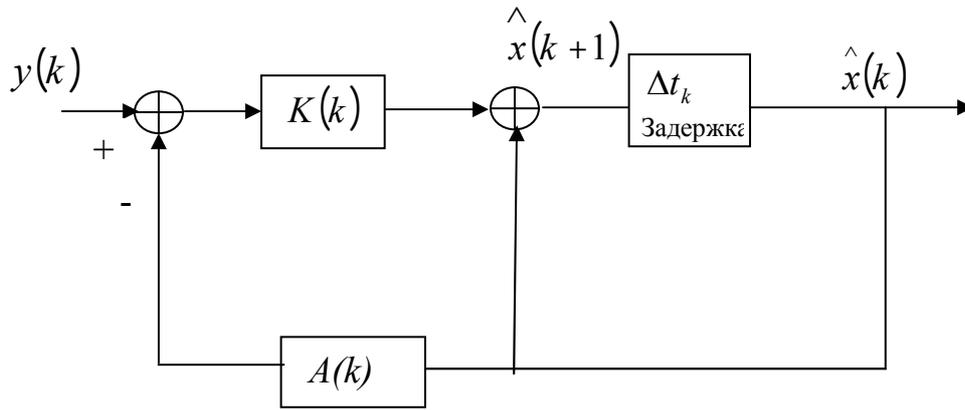


Рис.5 Структурная схема дискретного алгоритма Роббинса-Монро

Фильтрация сигналов от случайных погрешностей

Если погрешность преобразований является систематической, то есть подлежит учету и компенсации, то случайную погрешность заранее предсказать нельзя, а только можно уменьшить статистической обработкой многократных измерений.

Случайные погрешности сигналов датчиков наследуются промежуточными переменными. И отсюда переходят в погрешности искомым параметров. На этапе моделирования планируется специально вводить в сигналы датчиков случайные погрешности. Причем необходимо учесть, что условием применимости фильтра Калмана является нулевое математическое ожидание белого шума. Для генерации случайных погрешностей используется встроенный в Simulink генератор случайных чисел.

Фильтр Калмана (рис.5) используется для фильтрации случайных процессов. Для случайных величин можно использовать аналог фильтра Калмана процедуру Роббинса-Монро.

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

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + K(k) \left[y(k) - H(k) \hat{x}(k) \right], \quad (4)$$

где $y(k) = H(k)x(k) + \xi(k)$ - уравнение наблюдения, формирующее наблюдаемую статистику, $K(k)$ - коэффициент, обеспечивающий сходимость процедуры (4).

На рис.5 представлена структурная схема процедуры (4).

Как следует из рис.5 основное в алгоритме Роббинса-Монро, как и в фильтре Калмана использование оценок, полученных на предыдущем шаге для вычисления текущих оценок.

Коэффициент усиления в дискретном фильтре Калмана (рис.5)

$$K = \left(M^{-1} + A^T R^{-1} A \right)^{-1} A^T R^{-1}, \quad (5)$$

где -1 - обратная матрица, t - транспонирование матрицы, A - матрица системы уравнений

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 1 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & 0.8 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0.5 & -0.8 \\ 1 & -0.5 & -0.8 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

R - матрица дисперсий и ковариаций погрешностей датчиков

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

M - априорная ковариация погрешностей промежуточных переменных

$$M = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ранее при разработке калибратора [7] рассчитывались калибровочные таблицы для $\Gamma=0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,8$ и фаз $0^\circ-360^\circ$ с шагом 10° . То есть такая таблица содержит значения сигналов датчиков в тракте при разных сочетаниях модуля и фазы коэффициента отражения нагрузки. Калибровочная таблица послужила источником сигналов датчиков.

На рис.6 показано как процедура Роббинса-Монро реализуется средствами Simulink, кроме того приведены конкретные значения входных параметров из выражений (6)-(8) и калибровочной таблицы [7]. За начальное приближение приняты значения промежуточных переменных вычисленные на основе сигналов трех датчиков (рис.4). Например, для модуля коэффициента отражения нагрузки $\Gamma=0,8$ фазы коэффициента отражения нагрузки $\varphi=30^\circ$ значения промежуточных переменных 1,64; 1,386; 0,8 (рис.4 и табл.1 [7]).

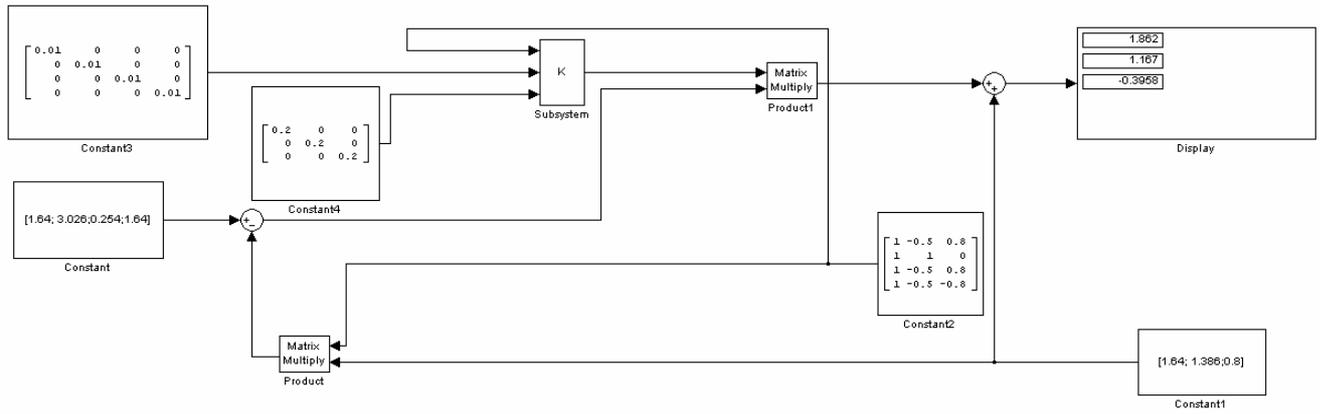


Рис.6 Фильтр Калмана

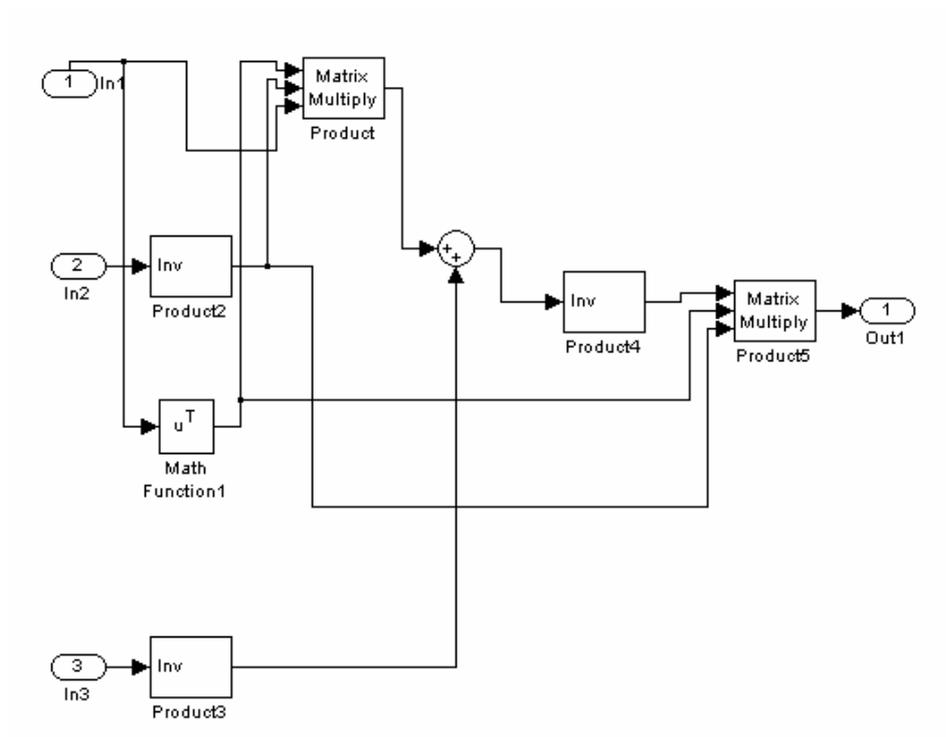


Рис.7 Коэффициент усиления фильтра Калмана по формуле (5)

Таблица 1

фаза ККО	модуль ККО	значение ЭДС на первом датчике	значение ЭДС на втором датчике	значение ЭДС на третьем датчике
0	0,05	0,91	1,210	0,91
	0,1	0,873	1,323	0,873

360	0,8	0,84	3,24	0,84

На рис.7 показан коэффициент усиления фильтра Калмана по формуле (5).

Фильтр Калмана представляет собой итерационный процесс. Количество шагов определяется требуемой точностью. Каждый следующий шаг состоит в добавлении информации еще одного датчика.

Анализ проделанных исследований показал работоспособность алгоритма, но в то же время полученные результаты несколько громоздки и сложны для инженерных расчетов.

На основе проведенного моделирования возникла идея упрощения алгоритма. На рис.8 показан упрощенный алгоритм многозондового микроволнового мультиметра для вычисления проходящей мощности.

Предлагается для расчета мощности использовать выражение

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = P_{nad} (1 + \Gamma^2) \quad (9)$$

А модуль коэффициента отражения нагрузки вычислять по формуле

$$\Gamma = \frac{P_i - P}{2P_{nad} \cos(\varphi + \theta)} \quad (10)$$

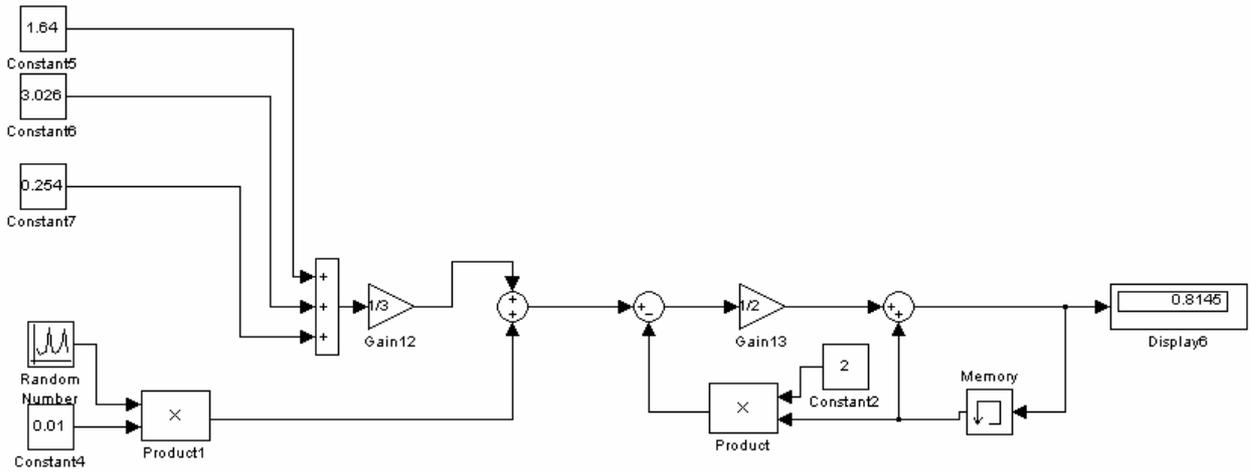


Рис.8 Упрощенный алгоритм многозондового микроволнового мультиметра для вычисления проходящей мощности

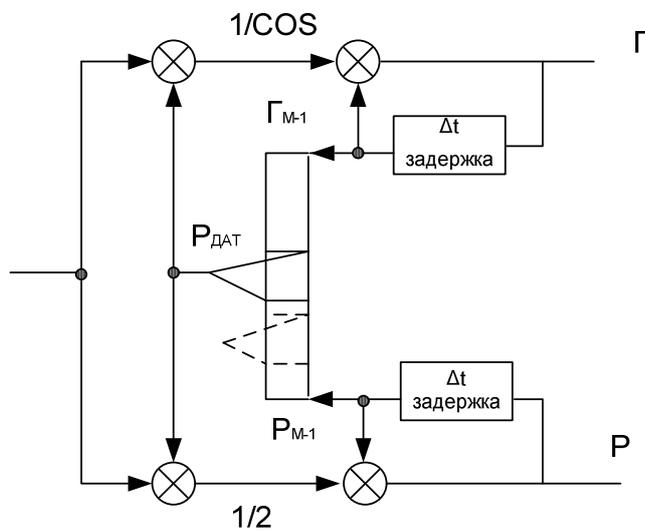


Рис.9 Упрощенный алгоритм многозондового микроволнового мультиметра

Выражение (9) представлено как структурная схема средствами Simulink с использованием фильтрации от случайных погрешностей. Если объединить выражения (9) и (10) в одну структурную схему, то мы получим двухканальное устройство изображенное на рис. 9.

Схема на рис.9 работает таким образом. В первом канале происходит итерационное вычисление по Роббинсу-Монро коэффициента отражения Γ , во втором - итерационное вычисление мощности P , а каналы связаны между собой ориентированным графом для переотражений, который связывает коэффициент отражения Γ и мощность. На выходе структурной схемы искомые мощность и коэффициента отражения определяются по известной формуле Мезона.

По правилу Мезона передача равна

$$k1 = \frac{1 / \cos(1 - L_4 - L_5)}{1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5} \quad (11)$$

С другой стороны

$$k1 = \frac{\Gamma}{P_m} \quad (12)$$

Отсюда

$$\Gamma = k1 \cdot P_m = P_m \cdot \frac{1 / \cos(1 - L_4 - L_5)}{1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5} \quad (13)$$

где L_1, \dots, L_5 -передачи замкнутых контуров.

Аналогично

$$k2 = \frac{1/2(1 - L_1 - L_2 - L_3)}{1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5} \quad (14)$$

По определению

$$k2 = \frac{P}{P_m} \quad (15)$$

Отсюда

$$P = k2 \cdot P_m = P_m \cdot \frac{1/2(1 - L_1 - L_2 - L_3)}{1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5} \quad (16)$$

Выводы. Таким образом, погрешность измерения многозондового микроволнового мультиметра может быть уменьшена путем усовершенствования его физико-математической и метрологической моделей. Исследование этих моделей привели к синтезу алгоритма, учитывающего систематические и случайные погрешности многозондового микроволнового

мультиметра. Этап синтеза алгоритма заключается анализом полученных выражений. Инструментом анализа выбрано имитационное компьютерное моделирование. Для анализа используется прикладной математический пакет Simulink Matlab. Для анализа и исследования была проведена декомпозиция задачи на подзадачи. Сперва моделируется СВЧ блок с учетом переотражений между соседними датчиками, затем фильтруются случайные погрешности, наконец, из сигналов датчиков вычисляются промежуточные переменные и из промежуточных переменных вычисляются искомые значения проходящей мощности, модуля и фазы комплексного коэффициента отражения нагрузки.

Результатами исследования явились

1) верификация алгоритма, которая показала совпадение полученных результатов с теоретическими соотношениями;

2) разработка графической модели СВЧ блока для произвольного количества датчиков, ранее количество датчиков, учитываемых в модели, ограничивалось сложностью аналитических расчетов;

3) дальнейшее развитие способа решения системы алгебраических уравнений, которое осуществляется графически. Оно основано на представлении системы алгебраических уравнений ориентированными графами, таким образом, используется единый математический аппарат (ориентированные графы) как для описания СВЧ блока, так и для дальнейшей обработки сигналов, снимаемых с СВЧ блока;

4) синтез новой двухканальной структурной схемы для упрощенных вычислений параметров сигналов и

трактов СВЧ, в которой в одном канале рассчитывается мощность, во втором канале – коэффициент отражения.

В перспективе, пользуясь предложенной моделью, можно проанализировать ряд метрологических характеристик многозондового микроволнового мультиметра и получить их количественные оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Черных И.В. *Simulink инструмент моделирования динамических систем*. 2003. – 260 с.
2. Дьяконов В.П. *Simulink 5/6/7/Самоучитель*. – М: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
3. Рожкова Д.А. *Моделирование систем линейных алгебраических уравнений в Simulink*. // Труды V Международной научно-практической конференции «Молодежь. Наука. Инновации», 2012. – Ч. 1. С. 204-207.
4. Klychuk 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 // Pomiry, automatyka, kontrola, vol.60, nr4/2014. – P.223 – 227.*
5. 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.
6. Измерение мощности на СВЧ / Билько М.И., Томашевский А.К. – М.: Радио и связь, 1976. – 250 с.
7. Пат. на корисну модель 60852 Україна, МКІ G 01 H 17/00. *Калібратор для багатозондового мікрохвильового мультиметра / О.Б.Зайченко (Україна)*. – №u201100049; Заявлено 04.01.2011; Опубл. 25.06.2011, Бюл. №12. – 3 с.

УДК 535.015

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДВУМЕРНОМ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Д.т.н. А.И. Филипенко, А.Н. Донсков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье представлены результаты моделирования распространения поперечной составляющей электрического поля в двумерном фотонно-кристаллическом волноводе, а также в волноводе с изгибом 90°. Приведены результаты распределения поля в волноводе при различных значениях длин волн излучения.

В статті представлені результати моделювання поширення поперечної складової електромагнітного поля в двовірному фотонно-кристалічному хвилеводі, а також у хвилеводі зі згином 90°. Приведені результати розподілу поля у хвилеводі при різних значеннях довжин хвиль випромінення.

The article presents the results of the electric field transverse component modeling in two-dimensional photonic crystal waveguide and in a waveguide with a 90° bend. The results of the field distribution in the waveguide for different values of wavelengths are shown.

Ключевые слова: модовое поле, фотонно-кристаллический волновод, фотонная запрещенная зона.

Введение

Фотонные кристаллы - это периодические диэлектрические структуры чередующихся слоев материалов с разными показателями преломления, которые влияют на распространение электромагнитных (ЭМ) волн из-за феномена фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) (рисунок 1). Распространение электромагнитных волн через фотонный кристалл зависит от длины волны. Для частот в пределах ФЗЗ, распространение электромагнитных волн внутри фотонного кристалла подавляется. Существование фотонных запрещенных зон позволяет нам создавать эффективные диэлектрические отражатели с малыми потерями, которые могут ограничить электромагнитное излучение в каналах (волноводах) или локализованных дефектах (резонаторах) с размерами, сравнимыми с длиной волны излучения [1].