

О.О. Дробахин, А.В. Доронин, Е.Н.Привалов  
**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В СВОБОДНОМ  
ПРОСТРАНСТВЕ МИКРОВОЛНОВЫМ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ**

Аннотация. На основе электродинамической математической модели системы антенна-отражатель для объектов с отражающими плоскими и неплоскими поверхностями методом конечных элементов получены сигналы зондов в волноводном тракте. Применение нейросетевых технологий для описания полученной модели позволило исключить влияние ряда искажающих факторов в СВЧ интерференционном методе измерений и вследствие этого повысить точность оценок местоположений объектов.

Ключевые слова. Интерференционный измеритель вибраций, нейронная сеть, отражающие объекты с неплоскими поверхностями

**Введение.** Усовершенствование средств измерения параметров механических перемещений и вибраций является актуальной научно-технической задачей. Микроволновые методы обеспечивают безынерционность и бесконтактность измерений. При нахождении исследуемого объекта в условиях термических нагрузок, наличия агрессивной среды именно эти обстоятельства являются решающим фактором в пользу выбора микроволновых методов.

**Анализ публикаций.** Для решения указанного класса задач могут быть применены радиолокационные средства [1]. Вместе с тем аппаратура в этом случае является достаточно сложной и дорогостоящей, что ограничивает широкое применение соответствующих средств. Наиболее популярным из микроволновых методов измерения параметров движения является интерференционный метод [2]. Согласно этому подходу измерение параметров вибрации объекта СВЧ методами сводится к измерению фазы соответствующего коэффициента отражения (КО) объекта, расположенного в свободном пространстве. Традиционно для измерения комплексного КО на одной частоте

применяется четырехзондовый измеритель [2], который может рассматриваться как устройство, реализующее интерференционный метод. Возможным также является использование трехзондового измерителя [3].

**Постановка задачи.** Однозначная связь между фазой измеряемого КО и расстоянием до объекта имеет место при условии зондирования плоской волной, что не соответствует действительности при использовании, например, апертурного излучателя. Оценить влияние формы объекта исследования, реальных характеристик приемопередающей антенны на фазовые характеристики внесенного КО в зависимости от расстояния между плоскостью апертуры и объектом в аналитическом виде не представляется возможным. Универсальным методом для получения указанных зависимостей является метод конечных элементов. Нейросетевые технологии позволяют получить по эмпирическим данным модели нейронных сетей, которые в неявном виде связывают данные.

**Цель исследований.** Повышение точности оценивания параметров перемещения контролируемого объекта на основе построения с помощью нейросетевых технологий неявной модели зависимости сигналов детекторов от положения объектов.

**Основная часть.** Полномасштабная электродинамическая задача для СВЧ части интерференционного измерителя параметров вибрации требует определения поля в области больших электрических размеров, что порождает задачи огромной размерности. Вследствие этого построение вычислительной схемы только на основе метода конечных элементов для решения задач указанного класса заведомо не только неэффективно, но и во многих случаях невозможно.

Расчет был проведен по упрощенной схеме. Методом конечных элементов производился расчет КО от металлического объекта электромагнитной волны, излученной рупорной антенной. Сигналы на зондах в волноводном тракте определялись как результат интерференции опорной падающей и отраженной волн на основе плосковолновой модели распространения в таком тракте по аналогии с тем, как это было проведено в [4]. Исключение из рассмотрения при расчете методом конечных элементов измерительной секции, а также генераторной части обусловлено тем, что их присутствие не влияет существ-

венным образом на структуру электромагнитного поля в пространстве между рупорной антенной и объектом.

Исходя из необходимости обеспечения компактности измерительной аппаратуры и максимального значения однозначного определения фазы, была выбрана длина волны 30 мм. Для рассматриваемой задачи опытным путем было установлено, что при этой длине волны, размерах апертуры рупорной антенны 40×40 мм, длине рупора 40 мм и сечении волновода 23×10 мм максимальными допустимыми размерами внешнего параллелепипеда являются 100×100×170 мм. Для выполнения условий расчета поперечные размеры металлического отражателя не должны превышать 70 мм.

Для большинства образцов объектов, подверженных вибрации, элементы их поверхностей, могут быть представлены в виде фрагментов плоских, выпуклых или вогнутых поверхностей. В качестве плоских отражателей были взяты металлические объекты в виде квадрата 70×70 мм и кругов с диаметром 70, 50 и 40 мм. В качестве неплоских поверхностей были выбраны части цилиндрической поверхности радиусом 66,25 мм, длиной образующей 70 мм и хордой 70 мм, ориентированные выпуклой или вогнутой поверхностью в сторону рупорной антенны. Расстояние от плоскости апертуры до отражателя изменялось в диапазоне от 50 до 155 мм с шагом 1 мм. Полученные зависимости имели интерференционный характер с шагом порядка 15 мм, что соответствует половине длины волны в свободном пространстве.

Результаты расчетов показали, что при ориентации вектора электрического поля параллельно образующей цилиндрической поверхности для вогнутой поверхности значения модуля КО при удалении отражателя от антенны существенно превышают значения модуля КО от плоского отражателя. Такое поведение КО может быть объяснено фокусирующим эффектом, имеющим место для вогнутого отражателя. Для случая отражателя с выпуклой цилиндрической поверхностью, как и следовало ожидать, значения модуля КО несколько ниже значений для плоского отражателя за счет эффекта более интенсивного рассеяния электромагнитной волны выпуклой поверхностью отражателя по сравнению с плоской.

Для случая ориентации вектора электрического поля перпендикулярно образующей цилиндрической поверхности эффект фокусирующего действия вогнутой отражающей поверхности не столь ярко

выражен по сравнению с предыдущим случаем. Относительно выпуклой поверхности отражателя можно сказать, что поведение КО аналогично случаю, когда вектор электрического поля параллелен образующей цилиндра.

Для отражателей в виде круга значения модуля КО для расстояний порядка 50-80 мм мало отличались при изменении радиуса, поскольку объект в этом случае перехватывает практически весь излучаемый пучок. Для больших расстояний значения модуля КО для дисков большего радиуса превышают соответствующие значения для кругов меньшего радиуса. Тот факт, что при различных расстояниях наблюдаются разные значения модуля КО, открывает возможность определения расстояния до объекта в отличие от случая сугубо плоской волны, когда результаты измерений для положений объекта, отстоящих на расстояние в полдлины волны, не отличаются друг от друга.

При равномерном перемещении отражателя, а также в предположении, что электромагнитная волна является плоской, фаза КО изменяется по линейному закону. Наибольшее отклонение фазовой характеристики от линейной имеет место для выпуклой цилиндрической поверхности по сравнению с вогнутой при ориентации образующей цилиндра параллельно вектору электрического поля. Для всех типов отражателей характерным является то, что в непосредственной близости от апертуры антенны отклонения максимальны, затем наблюдается некоторое уменьшение, а затем вновь небольшое увеличение.

Сопоставление отклонений фазовых характеристик КО в случае использования в качестве отражателей круга и квадрата также свидетельствует об их практической идентичности в диапазоне рассматриваемых перемещений отражающего объекта.

Следует отметить, что наибольшее отличие в отклонениях фазовой характеристики от линейной имеет место для выпуклой цилиндрической поверхности по сравнению с вогнутой при ориентации цилиндрической образующей параллельно вектору электрического поля. Для всех типов отражателей характерным является то, что в непосредственной близости от апертуры антенны отклонения максимальны, затем наблюдается некоторое уменьшение, а затем вновь небольшое увеличение.

Таким образом, форма отражающей поверхности рассмотренных отражателей в большей степени влияет на модуль КО. На фазе КО различия в формах отражающих поверхностей сказываются в меньшей степени, однако и в этом случае для вогнутой поверхности отражателя характерно меньшее отклонение фазовой характеристики от линейной. Данный факт может быть объяснен тем, что при вогнутой поверхности отражателя происходит частичная коррекция фазового фронта электромагнитной волны, а также ее фокусировка.

Отклонение фазовых характеристик от линейности вызывает существенные ошибки в определении расстояния до объекта при помощи интерференционных методов путем решения системы линейных уравнений по данным измерений 3-х и 4-х зондовыми методами в соответствии с подходом [4].

Для объекта в виде круга радиусом 70 мм максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого объекта от эталонных значений расстояния составило 2,52 мм; модуль среднего отклонения – 1,53 мм. Зависимость погрешности имеет осциллирующий характер с четко выраженным наличием тренда, ведущего к возрастанию ошибки. При моделировании отражения от объекта в виде плоского квадрата со сторонами 70×70 мм метод решения системы линейных уравнений для 4-х и 3-х зондов обеспечивал, соответственно, максимальную погрешность оценки 1,95 и 2,71 мм, а модуль среднего отклонения составлял 1,15 и 1,88 мм.

Для цилиндрической поверхности с образующей параллельной вектору электрического поля метод решения системы линейных уравнений для 4-х и 3-х зондов обеспечивал максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого объекта от эталонных значений 4,97 и 5,66 мм; модуль среднего отклонения – 2,05 и 2,79 мм. Таким образом, наличие кривизны отражающей поверхности привело к заметному возрастанию уровня погрешности.

Зависимость фазы КО от расстояния носит сложный характер, который не может быть описан простыми аналитическими соотношениями. С учетом уникальных возможностей нейронных сетей получать связи между массивами входных и выходных данных была исследована возможность оценивания значений местоположений объекта как выхода нейронной сети, обученной на значениях сигналов детекторов, которые будут получены для расположения объекта кон-

кретной формы, при условии его размещения на последовательности расстояний, охватывающих интересующий диапазон значений.

Для решения поставленной задачи была выбрана трехслойная рекуррентная нейронная сеть прямого распространения. В качестве функций активации нейронов входного и скрытого слоев были выбраны логистические функции (S-функции), для выходного слоя – линейная функция активации. Входной слой содержал в себе 3 нейрона, что соответствует числу входных сигналов от детекторов. Таким образом, была рассмотрена структура интерференционного измерителя с тремя зондами. Выходной слой содержал 1 нейрон, соответствующий линейной координате контролируемого объекта. Число нейронов во внутреннем (скрытом слое) подбиралось исходя из результатов тестирования натренированных моделей. Наилучшие результаты показала модель нейронной сети, имеющая 30 нейронов в скрытом слое, при этом был использован алгоритм Левенберга–Маркварда [5].

Точность тренировки нейронной сети составляла  $10^{-3}$ , что составляло в пересчете на выходные значения  $10^{-3}$  мм. Для тренировки использовалась лишь половина данных компьютерного моделирования (выбиралось каждое второе значение исходного множества данных) Качество функционирования натренированной математической модели нейронной сети контролировалось подстановкой всего имеющегося набора данных.

Максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого объекта в виде круга от эталонных значений составило 0,14 мм; модуль среднего отклонения  $7,8 \cdot 10^{-3}$  мм. Применение нейросетевых технологий для обработки данных для объекта в виде квадрата позволило получить максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого объекта от эталонных значений 0,13 мм и модуль среднего отклонения  $3,1 \cdot 10^{-3}$  мм.

Для выпуклой цилиндрической поверхности образующая, которой параллельна вектору электрического поля, при применении нейросетевых технологий максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого объекта от эталонных значений составило  $8,3 \cdot 10^{-3}$  мм; модуль среднего отклонения  $2,61 \cdot 10^{-3}$  мм. Для вогнутой цилиндрической поверхности образующая, которой параллельна вектору электрического поля, при применении нейросетевых технологий максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого

объекта от эталонных значений составило  $4,99 \cdot 10^{-3}$  мм; модуль среднего отклонения  $2,5 \cdot 10^{-3}$  мм. Для выпуклой цилиндрической поверхности образующая, которой перпендикулярна вектору электрического поля, при применении нейросетевых технологий максимальное отклонение оценки местоположения контролируемого объекта от эталонных значений составило  $8,94 \cdot 10^{-2}$  мм; модуль среднего отклонения  $3,39 \cdot 10^{-3}$  мм.

Таким образом, при наличии отклонений фазовой характеристики от линейной зависимости применение нейросетевых технологий позволило существенно повысить точность определения местоположений объекта по данным интерференционного метода измерений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Головки В.И. Радиолокационный контроль металлургических процессов. / В. И. Головки, О. Н. Кукушкин, Н. В. Михайловский и др. – Днепропетровск, Журфонд, 2010. – 428 с.
2. Бондаренко И.К. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов. / И. К. Бондаренко, К. А. Дейнега, З. А. Магачев – М.: Сов. Радио, 1969. – 301 с.
3. Drobakhin O. O. Holographic Approach to Microwave Measurement / O. O. Drobakhin, V. A. Karlov // Proceedings of 16-th International Symposium on Electromagnetic Theory – Thessaloniki, Greece, 1998. – V. 1. – pp. 109-111.
4. Дробахин О. О. Измерение параметров перемещения элементов конструкций интерференционным методом с применением нейросетевых технологий для обработки информации / О. О. Дробахин, А. В. Доронин, Д. Ю. Салтыков, В. В. Григорьев // Техническая механика. – 2009. – №1. – С. 118 – 122.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. / С. Хайкин. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.