УДК 621.396.677

ПРИМЕНЕНИЕ ГАУССОВСКОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА МИКРОПОЛОСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Кизименко В.В., Наумович Н.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kizimenko_v@bsuir.by

Аннотация: рассматривается применение гауссовской регрессии (GPR) для построения суррогатной модели прямоугольного микрополоскового излучателя, рассчитанного методом интегральных уравнений с тонкопроволочной аппроксимацией (МИУТ). Обучение выполнено на частотных зависимостях входного сопротивления, полученных МИУТ, валидация – по экспериментальным данным. Показано, что GPR воспроизводит резонансную частоту с погрешностью менее 0,1 %, что сопоставимо с точностью МИУТ и NI AWR MWO при времени предсказания порядка миллисекунд.

Ключевые слова: микрополосковый излучатель, метод интегральных уравнений, гауссовская регрессия, входной импеданс, машинное обучение, суррогатная модель, тонкопроволочная аппроксимация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Ранее была разработана математическая модель прямоугольного микрополоскового излучателя (ПМПА) на основе метода интегральных уравнений и тонкопроволочной аппроксимации проводящей пластины (МИУТ) [1-3]. Модель обеспечивает расчет входного сопротивления и диаграммы направленности при времени анализа менее 1 с на фиксированной частоте, что на порядок быстрее полноволновых 3D-решателей. Тем не менее при решении задач оптимизации и синтеза, требующих тысяч запусков решателя, даже такая скорость оказывается ограничивающей.

Одним из современных подходов к преодолению этого ограничения является построение суррогатных моделей на основе машинного обучения. В отличие от нейронных сетей, требующих тысяч обучающих примеров, гауссовская регрессия (Gaussian Process Regression, GPR) эффективно работает на малых выборках и, что важно для инженерных приложений, дает оценку неопределенности предсказания [4]. Целью настоящей работы является исследование применимости GPR для аппроксимации частотных зависимостей входного импеданса ПМПА с размерами 17 × 11 мм на подложке Rogers RT/duroid 5870 (ε = 2,33, h = 3,175 мм).

II. МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ GPR

В качестве обучающей выборки использованы результаты расчета МИУТ при KSC = 1 в диапазоне 6,3 - 7,3 ГГц с шагом 0,1 ГГц. Валидация выполнена по экспериментальным данным [2, 5]. Входной признак модели - частота f; выходные величины - активная R(f) и реактивная X(f) составляющие входного импеданса.

GPR рассматривает целевую функцию как реализацию гауссовского процесса, полностью задаваемого функцией среднего (принята нулевой) и ковариационной функцией (ядром). В работе использовано ядро Matérn 5/2, хорошо описывающее гладкие, но не бесконечно дифференцируемые процессы, характерные для частотных зависимостей импеданса. Целевые переменные R и X моделировались раздельно. Обучение и предсказание выполнялись средствами библиотеки scikit-learn. На рис. 1 приведены частотные зависимости *R(f)* и *X(f)*, восстановленные GPR-моделью, в сравнении с экспериментом и расчетом МИУТ.

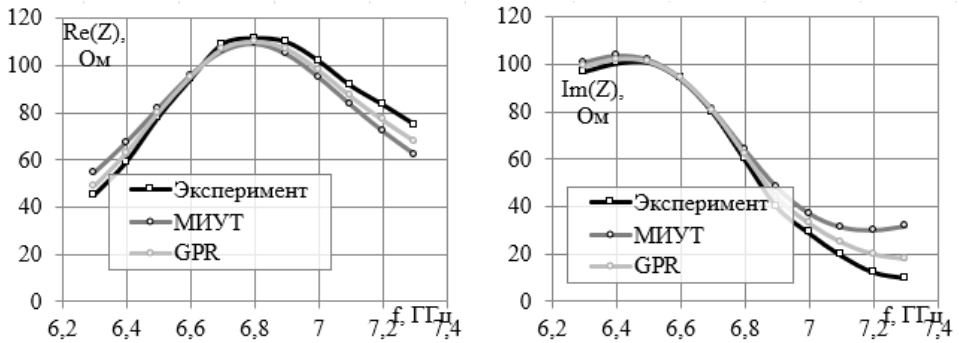


Рисунок 1. Частотные зависимости R(f) и X(f)

GPR модель воспроизводит три ключевые особенности частотной зависимости импеданса ПМПА: положение и амплитуду резонанса R (пик на 6,8 ГГц со значением 110 Ом); плавное убывание X на нижнем участке диапазона (6,3-6,9 ГГц); поведение X при f > 7,1 ГГц, где GPR дает промежуточное решение между экспериментом и МИУТ. Важно, что GPR не воспроизводит «разворот» реактивной составляющей, наблюдаемый в МИУТ при f > 7,1 ГГц. Экспериментальные данные [2] и физические соображения указывают на монотонное убывание X вплоть до резонанса тока, поэтому такое сглаживание следует рассматривать как достоинство модели: GPR выступает в роли регуляризатора, отфильтровывая артефакты численного метода. С вычислительной точки зрения обучение GPR на 11 точках занимает доли секунды, а предсказание импеданса на новой частоте — порядка 10^{-3} с, что на 3 порядка быстрее одного запуска МИУТ (< 1 с) и на 4 порядка быстрее NI AWR MWO (~8 с).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность применения гауссовской регрессии для аппроксимации частотных зависимостей входного импеданса прямоугольного микрополоскового излучателя, рассчитанного методом интегральных уравнений с тонкопроволочной аппроксимацией. GPR модель обеспечивает точность предсказания R и X с RMSE ≈ 4 Ом и $R^2 > 0{,}96$; корректное воспроизведение резонансной частоты; ускорение расчета импеданса в 10^3-10^4 раз по сравнению с численным решателем и полноволновым моделированием. Полученный результат подтверждает перспективность гибридного подхода «МИУТ + GPR» для задач оптимизации и синтеза микрополосковых антенных решеток. Дальнейшая работа предполагает расширение обучающей выборки на геометрические и физические параметры излучателя.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кизименко, В. В. Тонкопроволочная аппроксимация микрополоскового излучателя с учетом эффективной диэлектрической проницаемости подложки / В. В. Кизименко, А. В. Улановский // Доклады БГУИР. 2015. № 7 (69). С. 92-98.

[2] Kizimenko, V. Mathematical model of the microstrip radiator based on thin-wire approximation of metal patch / V. Kizimenko, A. Ulanouski // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv, Ukraine, 2015. P. 1-3. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136798.

[3] Кизименко, В. В. Мобильное приложение для моделирования характеристик микрополосковых антенных решеток методом интегральных уравнений / В. В. Кизименко, Н. М. Наумович // Информационные радиосистемы и радиотехнологии-2024 : материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции, Минск, 21-22 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. - Минск, 2024. - С. 49-51.

[4] Rasmussen, C. E. Gaussian Processes for Machine Learning / C. E. Rasmussen, C. K. I. Williams. MIT Press, 2006.

[5] Chang, E. An experimental investigation of electrically thick rectangular microstrip antennas / E. Chang, S. A. Long, W. F. Richards // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34, No 6. P. 767-772.

APPLICATION OF GAUSSIAN PROCESS REGRESSION FOR FAST ESTIMATION OF MICROSTRIP RADIATOR INPUT IMPEDANCE

V. Kizimenko, N. Naumovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kizimenko_v@bsuir.by

Abstract: the paper considers the application of Gaussian Process Regression (GPR) for constructing a surrogate model of a rectangular microstrip radiator calculated by the integral equation method with thin-wire approximation. Training was performed on frequency dependences of input impedance obtained by the IE method, validation – against experimental data. It is shown that GPR reproduces the resonant frequency with an error of less than 0.1 %, and impedance components – with RMSE ≈ 4 Ohm, comparable to the accuracy of the IE method and NI AWR MWO at prediction time of the order of milliseconds.

Keywords: microstrip radiator, integral equation method, Gaussian process regression, input impedance, machine learning, surrogate model, thin-wire approximation.