

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.5>

УДК: 53.08, 537.877

О ВАЛИДНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ДЕТЕКТИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ

К. М. Зейде, Д. С. Грищенко

Уральский Федеральный Университет, Институт радиоэлектроники и
информационных технологий, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32

Статья поступила в редакцию 26 июля 2021 г.

Аннотация. Данная работа посвящена проблеме повышения валидности натурного эксперимента по детектированию движения сплошной среды волноводным методом. В исследовании предпринимается попытка проведения оптимизации эксперимента для поиска оптимальной схемы его проведения. Целевым эффектом, магнитуда которого должна быть максимальной, является обобщенный коэффициент отражение, влияние, со стороны движущейся среды, на который, оказывают как коэффициент увлечения Френеля, так и кручение плоскости поляризации. Объектом исследования в настоящей работе является замкнутая электромагнитная система. Основная задача оптимизации – определить выходные параметры эксперимента по стабильному и достоверному детектированию движения сплошной среды в волноводе. В настоящей работе используется эвристический алгоритм анализа. Факторы оптимизации: частота зондирующего сигнала на СВЧ, физические размеры объектов, форма поперечного сечения волновода, линейная скорость движения среды. Для планирования эксперимента применялась *САПР PathWave EM Design (EMPro) 2021*. Движущейся средой является дистиллированная вода, что не является предметом оптимизации. Движение сплошной среды учитывается через ее уточненный индекс рефракции. Максимальная магнитуда целевого эффекта, наблюдается для топологии с прямоугольным волноводом и с трубкой, ориентированной вдоль широкой стенки при $f = [9,3 \div 9,5]$ ГГц. Данные значения

с хорошей степенью точности совпадают с уже проведенными натурными исследованиями.

Ключевые слова: валидность эксперимента, планирование эксперимента, оптимальный эксперимент, движение сплошной среды, волноводные измерения, распространение электромагнитных волн.

Abstract. Present work is devoted to the problem of validity increasing of an experiment to detect the motion of a continuous medium by the waveguide method. The study attempts to optimize the experiment to find the optimal scheme for its installation. The target effect, the magnitude of which should be maximum, is the generalized reflection coefficient, which is influenced by both the Fresnel electromagnetic drag coefficient and the polarization plane rotation due to motion of the medium. The main optimization task is to determine the output parameters for the experiment for stable and reliable motion detection of a continuous medium in a waveguide. In this work, a heuristic analysis algorithm is used. Optimization factors: frequency of the signal at microwave, physical dimensions of objects, shape of the waveguide cross-section, linear velocity of the medium. *ECAD PathWave EM Design (EMPro) 2021* was used to the experiment designing stages. Distilled water is the moving medium, which is not subject to optimization. The motion of a continuous medium is considered through its refined refractive index. The maximum magnitude of the target effect is observed for the topology with a rectangular waveguide and with a tube oriented along a wide wall at $f = [9.3 \div 9.5]$ GHz. These values coincide with a good degree of accuracy with the already conducted experiments.

Key words: experiment validity, experiment design, optimal experiment, moving continuous medium, waveguide measurements, electromagnetic propagation.

Введение

Данная работа посвящена проблеме повышения валидности натурального эксперимента по детектированию движения сплошной среды волноводным методом. Основная причина невысокой валидности такого эксперимента заключается в малости магнитуды целевого эффекта, что предполагает

проведение эксперимента на пороге чувствительности измерительного оборудования. Здесь предпринимается попытка проведения оптимизации эксперимента для поиска оптимальной схемы его проведения для наиболее уверенного детектирования целевого эффекта.

Планирование эксперимента по рассеиванию электромагнитных волн от вращающихся целей в свободном пространстве описано в статье [1]. Ряд учёных провели исследования, доказывающие возможность детектирования движения сплошной среды методами дистанционного зондирования и радиомониторинга [2, 3, 4]. Целевым эффектом, магнитуа которого должна быть максимальной, является обобщенный коэффициент отражение, влияние, со стороны движущейся среды, на который, оказывают как коэффициент увлечения Френеля [2], так и кручение плоскости поляризации [4].

Планирование эксперимента по наблюдению рассеянных от вращающегося диэлектрического цилиндра электромагнитных полей в свободном пространстве [1] выявило множество проблем. В основном эти проблемы были связаны с шумами, помехами, и прочими негативными явлениями, обусловленными, как внутренними эффектами экспериментальной установки, так и воздействиями внешней среды. В литературе неоднократно указывалась возможность проведения эксперимента на направляемых волнах в замкнутой электродинамической системе [5, 6] коей является полый волновод, рассматриваемый в настоящей работе.

В современной дефекто- и структуроскопии, а также мониторинге состояния среды существует очевидная необходимость в развитии новых подходов неразрушающего дистанционного бесконтактного высокоточного зондирования. В электромагнитной расходомерии жидкостей и газов, методами детектирования слабой бианизотропии движущегося диэлектрика, основной проблемой является малость магнитуды полезного эффекта [4, 5, 6]. Данная проблема стоит одинаково остро как в вычислительном эксперименте (вычислительная погрешность) [7], так и в натурном эксперименте (измерительная погрешность) [6]. В этом контексте уместно говорить о

валидности эксперимента, особенно внешней, так как, в силу незначительности эффектов, эксперимент, проводимый на пороге принятия решений, не может обладать должной повторяемостью результатов. Оптимизация и планирование, в этом случае являются ключевыми методами повышения валидности эксперимента.

Частично проблема вычислительного эксперимента была решена в работе [8], в которой приводится предел по точности конечно-элементной аппроксимации численного решения задачи дифракции и распространения электромагнитных волн в движущихся сплошных средах. Выводом данной работы может служить необходимость:

оптимизация самого эксперимента,
модернизация вычислительных подходов,
создании принципиально новых методик проведения
вычислительных экспериментов,
проведение верифицирующего натурального эксперимента,
обладающего высокой внешней валидностью.

Причины каждого из четырёх приведенных выше выводов очевидны, и являются главными мотивациями для настоящей работы, целью которой является проведение планирования и оптимизации целевого эксперимента для повышения его внутренней и внешней валидности.

Объектом исследования в настоящей работе является замкнутая электромагнитная система. Основная задача оптимизации – определить выходные параметры эксперимента по стабильному и достоверному детектированию движения сплошной среды в волноводе. В настоящей работе используется эвристический алгоритм анализа. Корректность выводов при таком методе исследования определяется количеством вариантов рассмотренных данных. Исходя из этого, опишем априорные данные планирования:

– прямоугольный волновод с проходящей через него трубкой вдоль широкой стенки;

- прямоугольный волновод с проходящей через него трубкой вдоль узкой стенки;
- круглый волновод с проходящей через него трубкой.

Все параметры оптимизации должны быть измеримы и однозначны. Также эти параметры должны оценивать эффективность функционирования системы. Параметр оптимизации – магнитуа целевого эффекта, измеряемая из определенной характеристики измерительной установки [1, 9].

1. Исходные данные

После выбора объекта исследования и параметра оптимизации, постараемся учесть все факторы, оказывающие существенное влияние на процесс измерения. Ко всему прочему, эти факторы должны быть управляемыми. При выборе нужного значения фактора должна оставаться возможность поддерживать его постоянным и неизменным в течении всего эксперимента. С учётом всех требований были выбраны следующие факторы оптимизации:

- частота зондирующего среду сигнала f ;
- физические размеры объектов (внутренний диаметр проходящей через волноводный тракт трубки d , диаметр отверстия в волноводе D (соответствует внешнему диаметру трубки), объём движущейся среды V);
- форма поперечного сечения волновода: прямоугольная или круглая;
- средняя осевая скорость движения сплошной среды v .

Запишем функция отклика:

$$F = S_{11}^{set}(f, d, v, [A]) - S_{11}^{ref}(f, d, v, [A]) \quad (1)$$

где $[A]$ – множество параметров, определяющих схему проведения эксперимента: форма поперечного сечения волновода (круглая, прямоугольная), расположение трубки в прямоугольном волноводе (вертикальное, горизонтальное), неучтенные ранее косвенные факторы D , V .

Как уже было отмечено выше старт оптимизации является эвристическим, так одним из ключевых априорных предположений является то, что оптимальный эксперимент может быть поставлен на СВЧ, в

стандартизированном диапазоне *X-band*. Важной предпосылкой к этому явился уже проведенный ранее натурный эксперимент [6], валидность которого остается сомнительной. Таким образом были выбраны следующие диапазоны измерений факторов: $f = [8 \div 12]$ ГГц, $d = [3 \div 10]$ мм, $v = [0 \div 4]$ м/с. Эти диапазоны могут быть объяснены еще и тем, что в определенном случае проведенный в [6] эксперимент может быть принят оптимальным, что автоматически повысит его валидность.

Расчёт (1) производится не менее чем на пятидесяти точках частотной зависимости. При $v = 0$ м/с расчет является референсом в (1), тогда как при $v > 0$ м/с целевым измерением. Согласно (1) целевой характеристикой является параметр цепи S_{11} . Надстрочный индекс *set*, означает целевое измерение, тогда как *ref* референсное значение. Важно отметить факт, что оптимальность детектирования движения сплошной среды волноводным методом именно по коэффициенту отражения, а не передачи, доказана в [6]. В ряде случаев такая электродинамическая система может также рассматриваться, как объемный резонатор [10]. Эта работа, в контексте настоящего исследования, ценна еще и тем, что в ней производится учет сквозных отверстий в узкой стенке прямоугольного волновода.

2. Планирование эксперимента

Для планирования эксперимента применялась *CAIP PathWave EM Design (EMPro) 2021*. Оценка осуществляется по классическим правилам остановки итерационного процесса:

$$\begin{cases} F \rightarrow \max \\ RxDT \rightarrow \min \\ F > RxDT \end{cases} (2)$$

где $RxDT$ – нулевой порог принятия решения о наличии целевого эффекта. Для вычислительного эксперимента эта величина всецело определяется вычислительной ошибкой [7]. Данный процесс полностью соответствует описанному в [11].

На рис. 1 показана общая схема эксперимента.



Рис.1. Структурная схема эксперимента для оптимизации (соответствует проведенному в [6]).

Здесь необходимо привести ряд пояснений. Согласно (1) физические и электродинамические параметры движущейся сплошной среды не являются факторами оптимизации. Это связано с принципиальными сложностями в постановке эксперимента при использовании среды отличной от воды. Детектирование движение воды имеет значительный практический интерес в рамках бесконтактной расходомерии. Следует также указать, что параметры дистиллированной воды стандартизированы, а это означает, что использование такой среды значительно повышает априорную валидность эксперимента (разброс по диэлектрическим параметрам среды минимален) [12]. Дистиллированная вода – мера для калибровки измерительного оборудования [13]. Таким образом в схеме эксперимента, показанной на рис. 1, движущейся средой является дистиллированная вода, единственным параметром, который существенно сказывается на целевую функцию (1), является ее температура, изменение которой в ходе эксперимента является паразитным явлением. Следует указать, что по этой части эксперимент уже оптимизирован, также была произведена оценка возможности применение эффекта увелечения

электромагнитных волн для проектирования новых типов электромагнитных расходомеров [14].

В контексте описания электродинамических параметров движущейся среды мы используем обобщенный алгоритм представленный в [15]. Движение сплошной среды может быть учтено через индекс рефракции следующим образом:

$$\Delta_N = \frac{-\varepsilon_r \pm \sqrt{\varepsilon_r^2 + \left(\frac{2\gamma c}{\omega}\right)^2}}{2} \quad (3)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость воды в покое, γ – постоянная распространения электромагнитной волны в движущейся среде. Знак в (3) выбирается в силу физической оправданности при вычислении соответствующей величины:

$$N_s = N + \Delta_N \quad (4)$$

где N_s – индекс рефракции движущейся среды, а N – покоящейся. Формулы для вычисления γ могут быть найдены в [2, 5, 6, 15]. Дисперсионные характеристики воды в исследуемом диапазоне частот могут быть получены из [13, 14, 16]. Строго говоря величины в (3) и (4), демонстрируют зависимость от частоты, которая, однако, не является критичной для учета в модели при проведении оптимизации.

На рис. 2 показаны модели анализируемых топологий для поиска оптимального [A] в (1) при критериях (2). Слева показана модель измерителя на основе круглого волновода (с диаметром 29,3 мм), в центре измеритель на основе прямоугольного волновода с трубкой, ориентированной вдоль узкой стенки, справа – измерительная установка, соответствующая [6]. Видно, что показанные топологии уже были оптимизированы по ряду факторов в [14]. В рамках установления (а также повышения) валидности натурального эксперимента [6] важно оценить оптимальность всех показанных топологий, тем самым доказать или опровергнуть эвристические предположения, выдвинутые ранее.

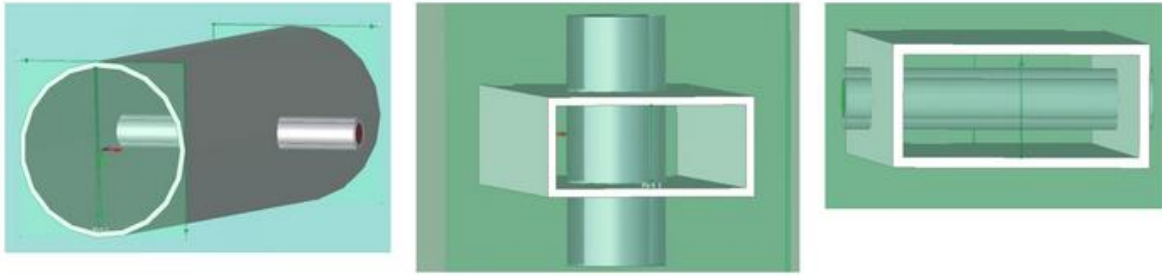


Рис.2 – Топологии исследуемых структур в EMPro.

Во всех моделях, показанных на рис. 2 материал трубки – HDPE с относительной диэлектрической проницаемостью равно 2,30 и тангенсом диэлектрических потерь 0,0003. Толщина трубки: $(D - d) = 1$ мм. Толщина стенок волноводов – 1 мм, материал – алюминий. Длина участка всех волноводов более двух длин волн на центральной частоте. С обеих сторон участок волновода ограничивается поверхностями типа «волноводный порт» – это позволяет моделировать относительно короткие линии передачи, работающие в одномодовом режиме. Исследование аналогичных структур с короткозамкнутой нагрузкой приводится в [10]. Температура воды – 26,2 С°.

3. Результаты оптимизации и валидность эксперимента

Оптимизации проводилась автоматической перестройкой значения переменных соответствующих факторов (1). На рис. 3 показаны частотные зависимости для функции отклика (1) для всех анализируемых топологий (см. рис.2), при которых справедлива оценка (2). Отметим, что показанные функции $F(f)$ были получены при максимальном значении $v = 4$ м/с. Внутренние диаметры трубок: $d = 3$ мм для черной и синей кривой, $d = 8,25$ мм для красной кривой.

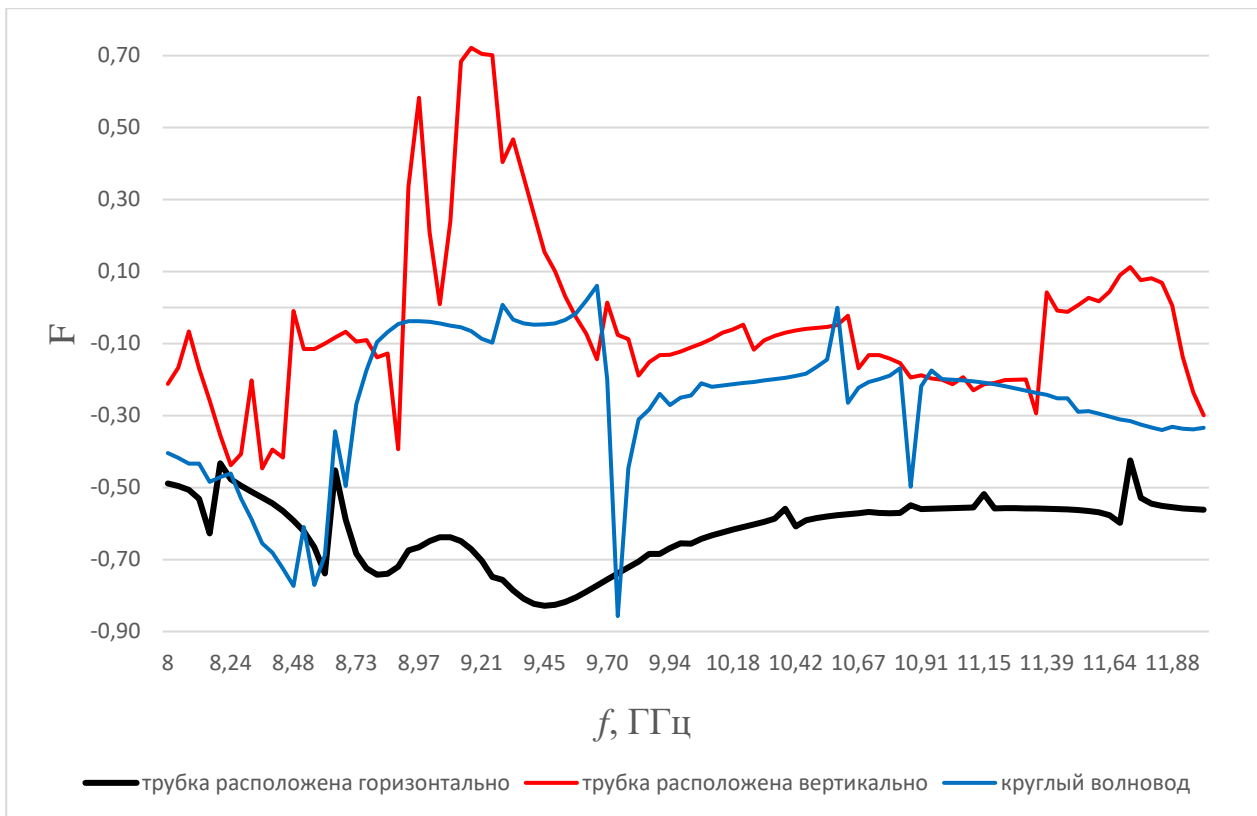


Рис.3. Наилучшие функции отклика $F(f)$ для каждой из анализируемых топологий.

Максимальная магнитуда целевого эффекта, согласно результатам показанным на рис. 3, наблюдается для топологии с прямоугольным волноводом и с трубкой, ориентированной вдоль широкой стенки (рис.2 справа) при $f = [9,3 \div 9,5]$ ГГц.

Обращаясь напрямую к исследованию [6] легко заметить хорошую степень согласованности экспериментальных и расчетных данных. Эксперимент, проведенный на границе чувствительности измерительного оборудования, может считаться успешным, так как в рамках настоящего планирования может считаться оптимальным, как по магнитуде наблюдаемого эффекта, так и по достигнутой в нем измерительной погрешности, не превышающей 23%.

Заключение

В данной работе рассматривается важная проблема повышения валидности натурального эксперимента, который, в настоящий момент, может быть проведен только на пороге чувствительности измерительного оборудования [6].

В любом возможном варианте его проведения вопросы внутренней и внешней валидности, в контексте повторяемости результатов, стоят очень остро. Отчасти они были решены описанным в данной работе планированием эксперимента для его оптимизации. Укажем основные результаты проведенного исследования:

– из всех рассмотренных топологий (см. рис. 2) максимальная магнитуда целевого эффекта в анализируемых диапазонах факторов оптимизации, ожидается для прямоугольного сечения волновода и горизонтальной ориентации трубки с $d = 3$ мм (т. е. для минимально диаметра);

– частотный диапазон, в пределах которого магнитуда эффекта максимальная, а функция отклика изменяется монотонно и без особенностей: $f = [9,3 \div 9,5]$ ГГц.

Анализируя эти выводы, можно сделать два заключения: первое – исходные эвристики оптимизации являются обоснованными и эффективными, второе – натурный эксперимент [6], при несущественных отличиях, может считаться оптимальным в рамках данного исследования. Второе заключение автоматически повышает валидность эксперимента, так как любая другая измерительная схема (из рассмотренных здесь) ожидаемо будет устанавливать более высокий порог по принятию решения о детектировании эффекта. Это, однако, не гарантирует повторяемости результатов в произвольных изменения параметров проведения эксперимента. Проблемы, обозначенные во введении настоящей работы, остаются открытыми.

Литература

1. Зейде К.М. Многофакторная нелинейная оптимизация нерелятивистского эксперимента по рассеянию электромагнитных волн от вращающихся целей. Нелинейный мир. 2017. №5. С.11-17.
2. Collier J.R., Tai C.T. Propagation of plane waves in lossy moving media. IEEE Transactions on antennas and propagation. 1964. Vol.12. No.3. P.375-376.

3. Censor D. Scattering of electromagnetic waves by a cylinder moving along its axis. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1969. Vol.MTT-17. No.3. P.154-158.
4. Pastorino M., Raffetto M., Randazzo A. Electromagnetic inverse scattering of axially moving cylindrical targets. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2015. Vol.53. No.3. P.1452-1462.
5. Bladel V.J. Relativity and engineering. New York: Laboratory for Electromagnetism and Acustica State University. 1984. P.214.
6. Zeyde K.M., Sharov V.V., Ronkin M.V. Guided microwaves electromagnetic drag over the sensitivity threshold experimental observation. WSEAS Transactions on Communications. 2019. Vol.18. P.191-205.
7. Ramakrishnan P.K., Raffetto M. Accuracy of finite element approximations for two-dimensional time-harmonic electromagnetic boundary value problems involving non-conducting moving objects with stationary boundaries. ACES Journal. 2018. Vol.33. No.6. P.585-596.
8. Ramakrishnan P.K., Raffetto M. Well Posedness and Finite Element Approximability of Three-Dimensional Time-Harmonic Electromagnetic Problems Involving Rotating Axisymmetric Objects. Symmetry. 2020. Vol.12. No.2.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд. второе переработанное и дополненное. Москва. Наука. 1976.
10. Зейде К.М. Исследование нагруженного на круглые отверстия прямоугольного резонатора в рамках теории возмущений. Уральский радиотехнический журнал. 2020. Т.4. №.3. С.261–276.
11. Зейде К.М., Коротков А.Н. Алгоритм сегментирования геометрии диэлектрического объекта по параметру степени малости целевого эффекта наблюдения. Стратификация линзы Люнеберга. Радиотехника. 2019. №1. С.15–23.
12. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. Введ. 1972–06–29. Москва. Изд-во стандартов. 2010. С.8.

13. Asif S., Braaten B., Iftikhar A. Effectiveness of a dielectric probe calibration using deionized, distilled and tap water. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2017. San Diego – USA. P.893–894.
14. Zeyde K.M., Sharov V.V. Fluid flow sensors design based on electromagnetic drag effect. ICCAIRO Conference Proceedings. 2019. Athens – Greece. P.48–53.
15. Zeyde K.M. Generalized approach for the rotating axisymmetric bodies electromagnetic scattering problems. USBEREIT Conference Proceedings. 2020. Ekaterinburg – Russia. P.238–241.
16. Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2004. Vol.42. No.9. P.1836–1849.

Для цитирования:

Зейде К.М., Грищенко Д.С. О валидности эксперимента по детектированию движения сплошной среды волноводным методом. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.5>