

# Новый метод расчета дисперсионных характеристик оптоволоконных линий

Малов Эдуард Эдуардович

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Мительман Юрий Евгеньевич

[e.e.malov@urfu.ru](mailto:e.e.malov@urfu.ru)

Оптоволоконные линии связи применяют в телекоммуникационных сетях различных уровней: от межконтинентальных магистралей до домашних компьютерных сетей. Интерес к оптоволокну вызван его особыми возможностями – высокая помехозащищенность и скрытность, низкое затухание при передаче на дальние расстояния и возможность работать с высокими скоростями передачи данных.

В настоящий момент актуальна тема исследований оптических волокон, изготовленных из полимеров. Оптические линии связи, выполненные из такого материала, обладают гораздо большими потерями – сотни дБ/км против единиц дБ/км у оптоволокна из кремниевого стекла, однако показатели скорости передачи и защищенности линии все еще высоки, а стоимость изготовления на порядок меньше, чем у кварцевого волокна. Полимерные волокна находят свое применение в областях промышленных линий связи, датчиков, автомобильной электроники, медицины, специальных/корпоративных сетей передачи данных и удаленного освещения.

Для анализа оптоволоконных линий самыми важными являются дисперсионные характеристики, которые описывают основные параметры линии передачи, такие как постоянная распространения, длина волны в линии, затухание, фазовая и групповая скорости, диапазон рабочих частот и тип основной волны. По этим характеристикам рассчитываются такие виды дисперсии в линии, как межмодовая, материальная, волноводная и поляризационная модовая.

Оптоволоконная линия передачи является многослойным диэлектрическим волноводом. Для анализа таких структур математически при классическом подходе записываются уравнения Гельмгольца относительно продольных составляющих полей гибридных волн круглого диэлектрического волновода в цилиндрической системе координат, затем эти уравнения решаются независимо в каждой однородной области пространства, после чего необходимо записать условия непрерывности тангенциальных составляющих векторов напряженностей электрического и магнитного поля на границах раздела между средами. Из записанных граничных условий и независимых решений во всех областях получается система из  $2N$  линейных однородных алгебраических уравнений относительно  $2N$  коэффициентов, где  $N$  – количество областей. Записывая условие нетривиальности решения системы, то есть приравнявая нулю главный определитель системы, получают дисперсионное уравнение для  $HE_{mn}$  и  $EH_{mn}$  волн. [1]

При увеличении количества слоев в структуре система уравнений становится плохо обусловленной, что серьезно затрудняет ее численное решение. Таким образом, классический подход к определению дисперсионных характеристик в многослойном диэлектрическом волноводе является сложной задачей, а сама математическая модель вносит существенные ограничения на количество слоев в исследуемой структуре.

Для решения проблемы со сложностью расчетов и ограничения количества слоев предлагается новый метод расчета дисперсионных характеристик, основанный на аппарате функций Грина и методе эквивалентных радиальных линий (рис. 1)

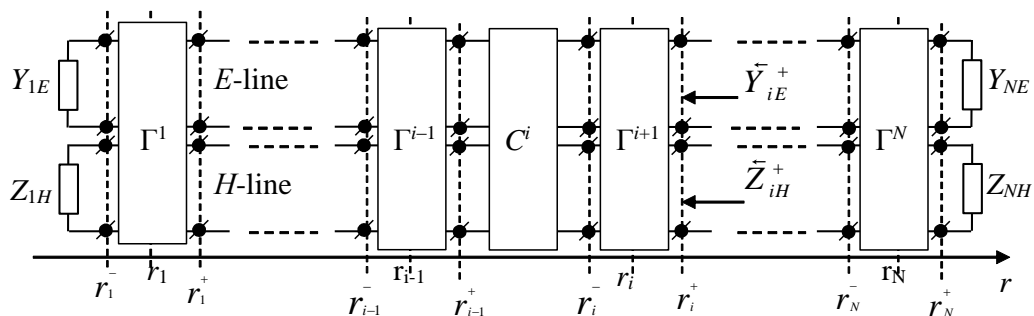


рис.1. Схема эквивалентной радиальной линии

В основу метода заложена идея представления компонент поля в виде ряда Фурье по азимутальным индексам и интеграла Фурье по продольным волновым числам от пространственных спектральных составляющих. Электромагнитное поле описывается как сумма электрических и магнитных волн, распространяющихся вдоль оси z, поэтому возможно преобразование волновых уравнений к системе из двух уравнений, содержащих спектральные компоненты электрического и магнитного полей, электрический и

магнитный сторонние токи. Волновые уравнения возможно привести к системе телеграфных уравнений для радиальной линии передачи, заменив спектральные компоненты полей на модальные напряжения и ток в эквивалентной радиальной линии. В итоге, используя методы теории цепей, мы смогли заменить многослойную структуру диэлектрического волновода с собственной волной на эквивалентную цепь, состоящую из двух эквивалентных радиальных линий – для Н- и Е-волн. [2]

Эквивалентные радиальные линии состоят из многополюсников, описанных матрицами границ и слоев, связывающими модальные напряжения и токи на портах, и двухполюсников – концевых модальных направленных сопротивлений и проводимостей линий, соответствующих граничным условиям на внутренних и внешних слоях структуры.

Для расчета дисперсионных характеристик необходимо решить уравнение, вытекающее из условия поперечного резонанса – сумма направленных модальных сопротивлений (проводимостей) влево и вправо от опорного сечения линии должна равняться нулю. Решение уравнения для сопротивлений соответствует дисперсионным характеристикам Н-волн, а проводимостей – Е-волн. [3]

Таким образом, для получения дисперсионных характеристик оптоволоконной линии передачи был предложен новый метод расчета, основанный на методе функций Грина и методе эквивалентных радиальных линий. Такой подход требует только решения уравнений условий поперечного резонанса для расчета дисперсионных характеристик. При этом особенности эквивалентных радиальных линий предоставляют возможность для расчета дисперсионных характеристик у структур с теоретически неограниченным количеством слоев. С добавлением очередного слоя в математический аппарат добавляется матрица передачи границы и слоя, то есть количество вычислений увеличивается линейно. Такие особенности предлагаемого математического аппарата предоставляют широкие возможности для исследования и анализа многослойных оптоволоконных линий передачи.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01396).*

Список публикаций:

[1] Неганов В. А., Оситов О. В., Раевский С. Б., Яровой Г. П. // *Электродинамика и распространение радиоволн. Учебник / Под ред. В. А. Неганова и С. Б. Раевского. Изд. 4-е, доп. И перераб.* – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с., ил.

[2] Мительман Ю. Е., Шабунин С. Н. // *Определение постоянных распространения в круглом слоистом волноводе. Вестник УГТУ-УПИ. Серия радиотехническая. Теория и практика радиолокации земной поверхности. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. № 19 (71). С. 165-169.*

[3] Князев С. Т., Мительман Ю. Е., Шабунин С. Н. *Применение аппарата функций Грина радиально слоистых структур к решению задач возбуждения, излучения и дифракции волн. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 31-37.*

## **Теоретические расчеты спектров селективного радиочастотного эксперимента ЯМР MUSLE: возбуждение одиночных линий мультиплетов**

**Морозов Максим Геннадьевич**

**Черныш Юрий Ефимович**

**Южный федеральный университет**

**Синявский Геннадий Петрович, д.ф.-м.н.**

**[morozov.rf.nmr@gmail.com](mailto:morozov.rf.nmr@gmail.com)**

Предлагается новая методика – возбуждение одиночных линий мультиплета MUSLE (MUltiplet Single Line Excitation), осуществляемая путем облучения исследуемого образца с помощью селективного радиочастотного возбуждения.

В новом эксперименте используются комбинации двух импульсов – селективного и неселективного или двух селективных импульсов. Каждая схема применима для конкретной задачи динамического ЯМР. В работе рассмотрено применение методики для слабосвязанной спиновой системы типа AX, для которой приведены квантово-механические расчеты на основе специально разработанной математической модели, основанной на формализме операторов произведения. Рассмотрим пять возможных различных комбинаций импульсных последовательностей, используемых в методике MUSLE [1]:

$$1. \left(\frac{\pi}{2}\right)_x - t_1 - \left(\frac{\pi}{2}\right)_x (A^1) - t_2 \qquad 2. \left(\frac{\pi}{2}\right)_x (A^1) - t_1 - \left(\frac{\pi}{2}\right)_x - t_2$$