

Трехпроводная линия в качестве измерительной ячейки для широкополосного измерителя диэлектрических параметров сред

А.В. Машуков, Н.П. Чубинский

Московский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл. 141700, тел. 8 495-408-5066
mashukov.av@mail.ru nchub@mail.mipt.ru

Исследована трёхпроводная линия, являющаяся основой измерительной ячейки (ИЯ) широкополосного измерителя комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) сред. Целью данной разработки являлось создание полевого прибора для неразрушающего определения ДП сред, допускающего наличие зазора между плоской границей исследуемого материала и ИЯ. По сравнению с известными конструкциями она допускает измерение ДП гранулированных сред и материалов с шероховатой поверхностью.

The three-wire line being a basis of measuring cell (MC) of a broadband measuring instrument of complex dielectric permeability (DP) of media investigated. The purpose of the given development was creation of the field tool for nondestructive testing of the medium DP, admitting presence of a air-gap between flat border of the investigated material and MC. In comparison with known designs it supposes control DP of the granulated media and materials with a rough surface.

В различных приложениях геофизики возникает необходимость оперативного измерения диэлектрических параметров различных грунтов, материалов и других сред с потерями. Для таких измерений широко используются волноводные методы, так как по сравнению с резонансными методами они не имеют ограничений по потерям в исследуемой среде.

Основой измерителя диэлектрической проницаемости (ДП) является измерительная ячейка (ИЯ). В диапазонах ВЧ и СВЧ в подавляющем большинстве конструкций измерителей ДП сред и материалов без нарушения их целостности измерительные ячейки представляют собой отрезки несимметричных микрополосковых линий (МПЛ) или резонаторы на их основе. Эти конструкции имеют несколько недостатков. Во-первых, они допускают измерение электрических параметров материалов с малыми потерями. Кроме того, погрешности измерения резко возрастают при наличии зазора между поверхностью исследуемой среды и активным проводником МПЛ. Ошибки могут достигать 25% и более при зазоре около десятков микрон [1].

Выбор ИЯ свободной от указанных недостатков является основой для создания полевого измерителя электрических параметров сред с заметным поглощением, в том числе, сыпучих или при шероховатой поверхности образцов. Первым шагом для решения этой задачи было использование экранированной копланарной линии [2]. В работах [3, 4] для ИЯ на основе копланарной линии была предложена и методика измерения. Она заключалась в регистрации частотных зависимостей амплитуды электрического поля в нагруженной исследуемым диэлектриком ячейке в нескольких фиксированных точках. Эти зависимости позволяли рассчитать начальное приближение для эффективной ДП и в дальнейшем рассчитать собственно ДП нагружающего материала. Уточнение результатов проводилось методом итераций.

В ходе исследования грунтов средней и высокой влажности [3], имеющих высокие значения ДП ($\epsilon'_r = 10 \dots 20$), установлено, что с ростом ДП исследуемой среды, и отчасти частоты, влияние зазора между активным проводником копланарной линии и средой становится достаточно большим. Для $\epsilon'_r \geq 10$ погрешность измерений достигает 30...40% при зазоре 0,25мм. Численное моделирование [5] подтвердило эти

результаты. Такая высокая погрешность делает измерение ДП для сыпучих и сред с шероховатой границей весьма проблематичным. Хотя здесь указанная величина неровностей на порядок больше, чем для измерительной ячейки на основе МПЛ [1].

Для того чтобы уменьшить влияние воздушного зазора между проводниками и исследуемой средой была предложена конструкция ИЯ на основе трёхпроводной линии (ТЛ), моделирующей копланарную линию с высоким волновым сопротивлением. При измерении электрических параметров ее проводники соприкасаются с исследуемой средой. Для жидких и сыпучих сред возможно частичное «погружение» проводников в исследуемую среду. Введем эффективную величину зазора между проводниками ИЯ и исследуемой средой как глубину «погружения» в нее проводников ТЛ. Когда цилиндрические проводники касаются исследуемой среды вдоль линий образующих будем говорить, что «зазор» заполнен воздухом (случай AIR), а в случае, когда проводники погружены в исследуемую среду, – что «зазор» заполнен исследуемым материалом (случай МАТ). На рис. 1 приведена геометрическая конфигурация ИЯ на основе ТЛ. Система симметрична относительно центрального проводника. На рисунке приняты следующие обозначения: D – диаметр проводников, d – расстояние между осями проводников, Δ – величина «зазора». Пространство над проводниками заполнено исследуемой средой с диэлектрической проницаемостью ϵ'_R и тангенсом угла потерь $tg\delta_R$. Система проводников 1, 2, 3 размещена в экране 4, стенки которого находятся на расстоянии более 20 мм от проводников. При этом наличие экрана слабо влияет на волновое сопротивление ненагруженной ИЯ. Под экранами находится экранированная полость 5 для размещения электронных устройств регистрации и первичной обработки сигналов датчиков электрического поля, необходимых для вычисления эффективной ДП. Вдоль продольной оси располагается несколько (от двух до четырех) датчиков электрического поля – 6. Проводники закреплены на торцах диэлектрических пластин 7.1, 7.2, 7.3, толщина которых приблизительно равна диаметру проводников. Проницаемость материалов опорных пластин равна 4.2. Искомая комплексная ДП нагружающего измерительную ячейку материала находится по калибровочным зависимостям [3].

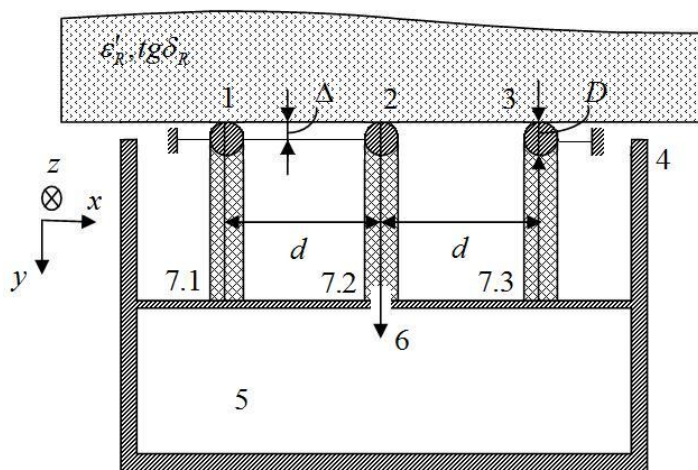


Рис. 1. Сечение измерительной ячейки на основе трехпроводной линии

При численном моделировании в среде Ansoft HFSS 10 ТЛ было необходимо проанализировать влияние эффективного «зазора» на величину эффективных диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Это влияние зависит от конструкции измерительной ячейки. Поэтому в процессе моделирования варьировалась

её геометрия. Были определены зависимости волнового сопротивления ТЛ и эффективной диэлектрической проницаемости от наличия «зазора». Установлено, что влияние «зазора» увеличивалось с ростом действительной ДП исследуемой среды ε'_R . На рис. 2 и рис. 3 приведены относительные погрешности действительной эффективной ДП ε'_E при наличии «зазора» 0,25 мм и для различных значений D и d на частоте 0.3 ГГц.

На графиках видно, что при увеличении диаметра проводников или расстояния между ними погрешность измерений, вносимая зазором, уменьшается. Для дальнейших расчетов была выбрана конфигурация $D=3\text{мм}$; $d=11\text{мм}$ и фиксированной величиной эффективного зазора равной 0.25мм. Дальнейшее увеличение расстояния между проводниками может привести к сложности согласования линии со свип-генератором. Для этой конфигурации, как видно на рис. 2 вносимая зазором погрешность не превосходит 20% при $\varepsilon'_R \leq 10$, что соответствует достаточно большому диапазону различных сред.

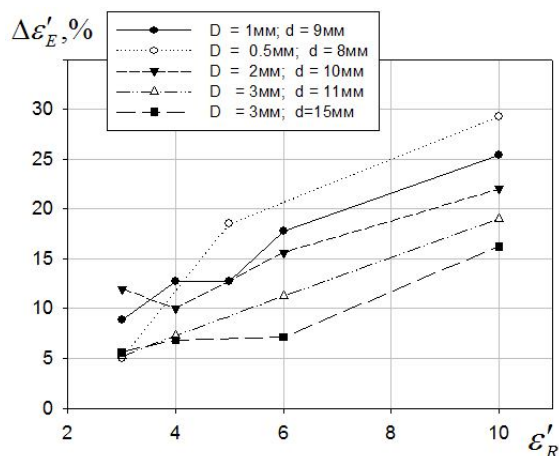


Рис. 2. Графики зависимости относительного изменения в процентах действительной эффективной ДП от ε'_R для различных значений D и d

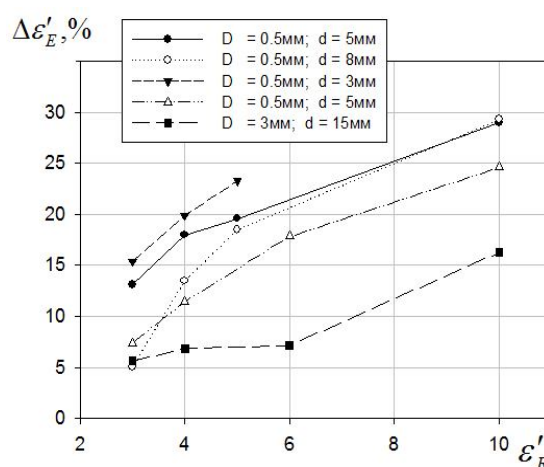


Рис. 3. Графики зависимости относительного изменения в процентах действительной эффективной ДП от ε'_R для различных значений D и d

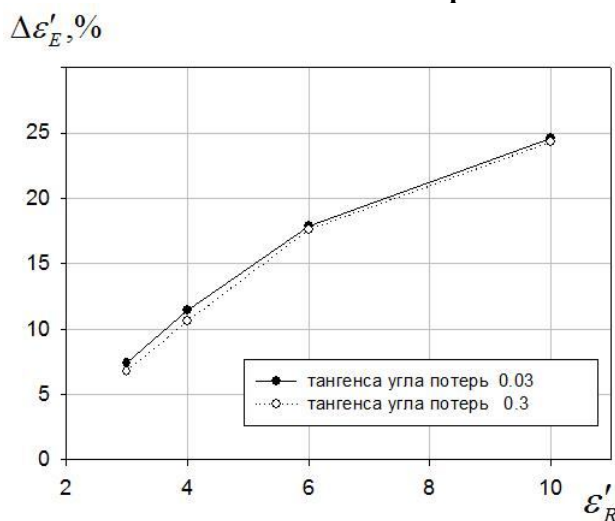


Рис. 4. Графики зависимости относительного изменения в процентах действительной эффективной ДП от ε'_R для значений $\text{tg}\delta_R$ 0,03 и 0,3 при $D=0,5\text{мм}$, $d=12\text{мм}$

Было изучено также влияние потерь в исследуемой среде на погрешность вносимую зазором для конфигурации $D=0.5\text{мм}$, $d=12\text{мм}$. Результаты для $tg\delta_r=0,03$ и $0,3$ при различных значениях ДП исследуемой среды приведены на рис. 4. Даже большие потери ($tg\delta_r=0,3$) очень слабо влияют на величину ε'_E и на погрешность, вносимую зазором.

При численном моделировании трехпроводной линии (с $D=3\text{мм}$; $d=11\text{мм}$) для максимально точного вычисления постоянной распространения использовался режим согласованной нагрузки, то есть линия нагружалась на сопротивление, близкое к волновому. Было выяснено, что при увеличении частоты источника волновое сопротивление линии изменяется и при достижении некоторой критической частоты начинает резко уменьшаться. Причём чем больше проницаемость среды, тем ниже значение критической частоты. При приближении к критической частоте волновое сопротивление линии уменьшается, что выражается в ухудшении сходимости решения. Для случая $D=3\text{мм}$; $d=8\text{мм}$ при $\varepsilon'_R=10$ критическая частота равна приблизительно $0,45$ ГГц, что накладывает определенные ограничения на частотный диапазон измерений, а практически на диапазон проницаемостей исследуемой среды.

Были получены графики (рис. 5) калибровочных зависимостей $\varepsilon'_R(\varepsilon'_E)$ для частот $0,1$; $0,3$ и $0,5$ ГГц. Калибровочная зависимость связывает ДП исследуемой среды ε'_R с эффективной ДП ε'_E , которая находится в результате измерений.

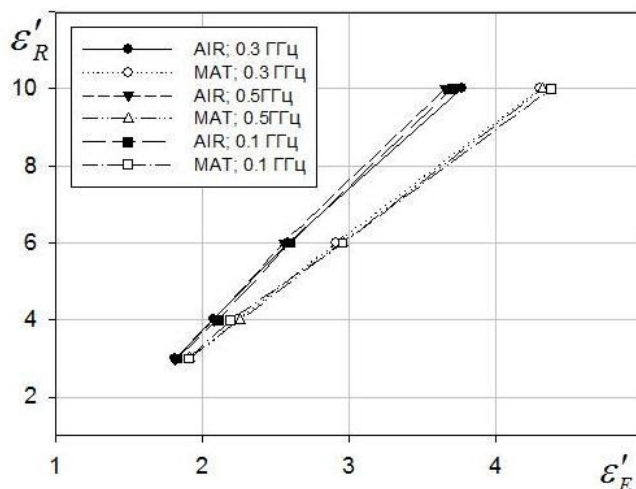


Рис. 5. Калибровочная зависимость $\varepsilon'_R(\varepsilon'_E)$ трехпроводной линии $D=3\text{мм}$; $d=11\text{мм}$ для случаев AIR, MAT и частот $0,1; 0,3; 0,5$ ГГц

На рис. 5 видно что для случая MAT зависимости для различных частот почти не отличаются, в то время как для случая AIR с ростом частоты ε'_E уменьшается и графики начинают расходиться. Таким образом, с ростом частоты увеличивается и влияние эффективного зазора.

Проведенные расчеты показали, что измерительная ячейка на основе трехпроводной линии может быть использована для измерения эффективной ДП широкого диапазона сред даже с высокими потерями. Было качественно определена приемлемая геометрия трёхпроводной линии, позволившая снизить влияние эффективного зазора. Приведенные на рис. 5 калибровочные кривые показывают слабую зависимость эффективной ДП от частоты в диапазоне $0,1 \dots 0,5$ ГГц.

Литература

1. Itoh T.A. New method for measuring properties of dielectric materials using a microstrip cavity.- IEEE Trans. MTT, 1974, v.22, №5, p. 572-576/
2. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. Под редакцией В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
3. Филоненко В.А., Чубинский Н.П. Прибор для измерения диэлектрической проницаемости сред со средними и большими потерями// Научный вестник МГТУ ГА №58. Серия Радиофизика. – М.: 2006.
4. Машуков А.В., Чубинский Н.П. Вычисление волнового сопротивления нагруженной диэлектриком копланарной линии// Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Труды 51-й научной конференции МФТИ. Т. VIII / МФТИ. – М.:2008. – С. 51-54.
5. Машуков А.В., Чубинский Н.П. Расчет дисперсионных поправок к калибровочной характеристике измерительной ячейки на основе копланарной линии//Сб. докладов 4-й Всерос. науч. школы и конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2009. 30 июня-3 июля. 2009 г., с. 391-395. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – № гос. регистрации 0320901239.