

В. Ф. Манойлов, д. т. н., проф.; Л. Ю. Назарчук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ МОДЕЛИ

Статья посвящена методу определения диэлектрической проницаемости биологических объектов с помощью частотной зависимости коэффициента отражения по напряжению от двухслойной плоской среды. Показано, что диэлектрическая проницаемость полупространства зависит не только от частоты, но и от типа поляризации и угла падения электромагнитной волны. Данный метод может быть применен в диагностике опухолевых заболеваний человеческого организма.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексный коэффициент отражения по напряжению.

Введение

Первой и основной задачей в области радиоволнового контроля состава и свойств веществ является измерение диэлектрической проницаемости. Наибольшее распространение получили сверхвысокочастотные методы, которые нашли свое применение в строительстве, сельском хозяйстве и медицинской диагностике.

Проблема взаимодействия электромагнитных полей с живыми организмами привлекает внимание ученых возможностью применения в медицине, особенно при дистанционном определении структуры биологического объекта, моделировании искусственных объектов с электродинамическими характеристиками, максимально приближенными к характеристикам реальных биологических объектов.

Одной из физических величин, которая характеризует свойство среды поглощать электромагнитные волны, распространяющиеся в ней, является комплексная диэлектрическая проницаемость. Значение этой величины зависит от физической природы среды [1]. Большинство исследований связаны с измерением абсолютных значений диэлектрической проницаемости материалов и жидкостей. Таким образом, определение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости биологических жидкостей и объектов является важной задачей при исследовании их структуры и характеристик.

Обзор источников

В последние десятилетия интенсивно проводят исследования распространения электромагнитных волн в лесных покровах. Особую актуальность такие исследования приобрели с развитием методов дистанционного зондирования земной поверхности. Это связано с существенным влиянием лесов на параметры электромагнитных излучений практически любых диапазонов, которые определяют особенности распространения волн вблизи земной поверхности.

В работе [2] рассмотрен метод определения диэлектрической проницаемости растительных сред в низкочастотной части ультракоротковолнового (УКВ) диапазона. По своим электрофизическим характеристикам лесная среда аналогична неидеальному диэлектрику, поэтому процессы отражения и преломления волн на верхней кромке леса зависят в основном от действительной части ее диэлектрической проницаемости. Метод основан на проведении непосредственных измерений ослабления поля в лесу. Считалось, что в данном частотном диапазоне лесная среда изотропна. Тогда определение ее диэлектрической проницаемости свели к независимым измерениям действительной и мнимой частей скалярной величины.

Последние сорок лет для решения широкого спектра задач по оценке состояния горного массива все чаще используют георадиолокацию – технологию, использующую при изучении подземного пространства принципы радиолокации (активно разрабатывается в США, Франции, Швеции, России и др.). Метод электромагнитного импульсного (ЭМИ) сверхширокополосного (СШП) зондирования как один из методов георадиолокации нашел применение в инженерной геологии и строительной индустрии за счет увеличения глубины исследований.

В работах [3 – 4] представлен метод подповерхностного ЭМИ СШП зондирования, который реализован с использованием генераторов на дрейфовых диодах с резким восстановлением обратного напряжения для излучения электромагнитных волн. Значительная глубина распространения сигнала обусловлена возникновением низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости среды, наличие которой определяется поляризацией с дипольно-релаксационными механизмом, которая описывает поведение влажной почвы под воздействием сильного электромагнитного импульсного поля.

В процессе низкоэнергетического электромагнитного облучения биологических тканей происходит ионизация молекул вещества и образование радикальных пар. Таким образом, внешние низкоэнергетические электромагнитные поля оказывают влияние на молекулярную структуру биологических веществ, а следовательно, и на их электрофизические характеристики – действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости. Данные изменения приводят к изменениям характеристик изучаемого объекта.

Работа [5] посвящена рассмотрению влияния электромагнитного поля сверхвысокой частоты на биологические объекты в сельскохозяйственном производстве. Оценку состояния биообъектов выполняли с помощью метода диэлектрической радиоспектроскопии. По уровню ионизации биологической среды определяли тенденции в изменении диэлектрической проницаемости. В связи с этим была рассмотрена вероятностная модель процессов, происходящих в биологических средах под влиянием внешних электромагнитных полей, которая позволила определить количественные изменения электрофизических характеристик биологических тканей.

В работе [6] представлен метод определения резонансного угла и метод фазовых измерений коэффициента отражения, которые используют для определения диэлектрических параметров биологических объектов. Также произведен расчет датчика для анализа состава биологических сред. Высокая чувствительность таких сенсоров обусловлена резонансной зависимостью выходных величин датчика от параметров среды. В качестве информационных параметров используют интенсивность, угол падения и фазу отраженной волны. В конструкции биосенсора была использована трехслойная модель, а именно: среда 1 представляла собой стеклянную призму, среда 2 – слой золота или серебра толщиной d , среда 3 – исследуемая биологическая среда, которая считалась полубесконечным пространством. Показано, что метод является универсальным в широком диапазоне диэлектрических параметров исследуемых объектов.

Но, несмотря на высокую чувствительность данных методов, существуют определенные ограничения в их применении, а именно: высокая сложность оптической схемы для реализации фазовых измерений коэффициента отражения, которая может быть реализована только в условиях специализированных лабораторий.

Ближнеполевая локация сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона является эффективным методом исследования материалов и сред различной физической природы и широко используется в микроэлектронике, материаловедении, дефектоскопии и медицинской диагностике. Высокая чувствительность антенны к изменению диэлектрической проницаемости среды позволяет выполнять диагностику на некотором расстоянии исследуемой области от апертуры зонда. При этом важной характеристикой является глубина зондирования – расстояние внутри объекта, на котором еще заметны изменения диэлектрической проницаемости среды. В работах [7, 8] показано, что для ближнеполевой

локации значения глубины зондирования могут достигать нескольких сантиметров. Также представлена возможность применения ближнеполевой локации СВЧ-диапазона для определения злокачественных образований внутри биологической ткани. Теоретические результаты получены с помощью теории плоскостойких сред. В работе представлена электродинамическая модель для диагностики сильно неоднородных слоистых сред.

В работе [9] рассмотрены эффекты радиационного взаимодействия при ближнеполевой диагностике биологических тканей. Расчет проводили на основе теории ближнеполевой локации плоскостойкой среды, с помощью которой определяли комплексный импеданс зонда, изменение которого происходило при изменении диэлектрической проницаемости биологической ткани.

Известно, что возникновение и развитие многих заболеваний опорно-двигательного аппарата у детей и подростков связаны с ухудшением основных процессов регуляции жизнедеятельности организма. Качество процессов жизнедеятельности (норма или патология) изменяет электродинамические параметры организма, прежде всего, диэлектрическую проницаемость тканей. Отсюда следует, что оценка диэлектрической проницаемости может служить показателем функциональной активности организма.

В работах [10, 11] рассмотрена возможность определения электродинамических параметров биологических тканей с использованием дистанционного метода. Показана принципиальная возможность использования методики для неинвазивной диагностики биообъектов и проведено исследование возможностей метода высокочастотного ближнеполевого зондирования на конкретных примерах опорно-двигательного аппарата у подростков путем измерения величины диэлектрической проницаемости живой ткани.

Анализ различий в свойствах биологических тканей поглощать и рассеивать электромагнитное поле лежит в основе метода волноводного электромагнитного зондирования [12 – 14]. Результаты исследования данным методом позволяют оценить пространственное распределение диэлектрической проницаемости биологического объекта и сделать вывод о степени поглощения мощности электромагнитного поля в биологических тканях. Математическая модель метода основана на решении задачи дифракции электромагнитного поля на поглощающем объекте, помещенном в волновод. Соответствующая краевая задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Преимущество метода интегральных уравнений заключается в возможности получения картины поля по всему объему, включающего диэлектрическую неоднородность.

В работе [15] рассмотрена задача определения дифракционной картины поля на неоднородном диэлектрическом образце, моделирующем биологический объект. Методом волноводного электромагнитного зондирования исследовали влияние электродинамических и геометрических характеристик образца на распределение рассеянного электромагнитного поля. Также проводили моделирование дифракции электромагнитных волн на слоистой неоднородности в волноводе. Численные расчеты выполнены на примере плоского волновода, содержащего трехслойную модель биологической среды. Диэлектрическая проницаемость наружных слоев принималась равной диэлектрической проницаемости мышечной ткани, а внутреннего слоя – костной ткани.

Результаты исследования диэлектрических свойств в ММ диапазоне слабых растворов глюкозы в воде и физиологическом растворе, а также диэлектрических свойств крови и кожи представлены в [16]. Исследования проводились с помощью разработанного с этой целью метода измерения комплексной диэлектрической проницаемости среды с большими потерями, который не требует фазовых измерений комплексного коэффициента отражения. Методика позволяет определить содержание глюкозы в крови в реальном времени по одной капле крови.

Постановка задачи

Ранняя диагностика опухолей молочной железы сегодня является одной из актуальных

проблем. Изменение диэлектрической проницаемости и температуры тканей обычно предшествует структурным изменениям, которые определяют стандартными методами исследования молочной железы – УЗИ, маммографии.

Следовательно, проблема определения комплексной диэлектрической проницаемости биологических тканей является одним из необходимых условий при диагностике структурных изменений организма человека, а именно: при локализации опухолевых процессов. Поэтому разработка нового метода для определения диэлектрических характеристик биологических тканей является важной задачей в диагностике новообразований. Новизна данного радиотехнического метода заключается в определении комплексной диэлектрической проницаемости биологических сред с помощью коэффициента отражения по напряжению в диапазоне частот. Также данный метод усовершенствован путем введения математической модели ближнеполевого взаимодействия "антенна – биологическая среда" [17].

В работе [18] представлен метод определения диэлектрических параметров плоской трехслойной модели (включая воздух) биологической среды с относительными диэлектрическими проницаемостями слоев $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ посредством анализа частотной зависимости коэффициента отражения $R(f)$ в диапазоне 1,4 ... 1,6 ГГц.

Двухслойные модели сред – это частный случай плоских трехслойных моделей, когда биологическую среду рассматривают как диэлектрическое полупространство (рис. 1).

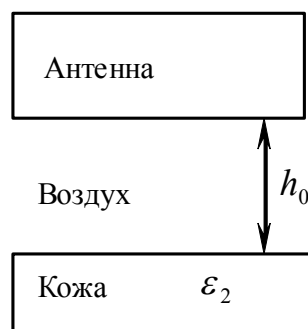


Рис. 1. Моделирование биологической среды организма человека с помощью двухслойной модели, h_0 – высота расположения антенны над структурой

В данном случае диэлектрическая проницаемость биологической среды имеет следующую зависимость по глубине

$$\varepsilon(y) = \begin{cases} \varepsilon_1 = 1, & 0 < y \leq h_0, \\ \varepsilon_2, & y > h_0. \end{cases}$$

Целью работы является рассмотрение метода определения комплексной диэлектрической проницаемости среды посредством анализа частотной зависимости функции коэффициента отражения по напряжению $R(f)$ радиоволн. Для этого рассмотрим случаи падения электромагнитной волны (ЭМВ) на двухслойную структуру.

Произвольное падение ЭМВ с перпендикулярной поляризацией

Рассмотрим случай произвольного падения ЭМВ с перпендикулярной поляризацией на двухслойную структуру (рис. 2).

Рассматривая только абсолютные величины векторов составляющих электромагнитных волн, т. е. проекции векторов электромагнитных волн на ось Oy , запишем выражения для падающей и отраженной волн в первой среде

$$E_1 = E_{1m} e^{\gamma_1 y \cos a_1}, H_1 = \frac{\cos a_1}{Z'_1} E_{1m} e^{\gamma_1 y \cos a_1},$$

$$E_2 = E_{2m} e^{-\gamma_1 y \cos a_1}, H_2 = \frac{\cos a_1}{Z'_1} E_{2m} e^{-\gamma_1 y \cos a_1},$$

где E_{im} – комплексные амплитуды векторов электромагнитного поля, $\gamma_1 = -\frac{2\pi f}{c}$ – постоянная распространения в первой среде.

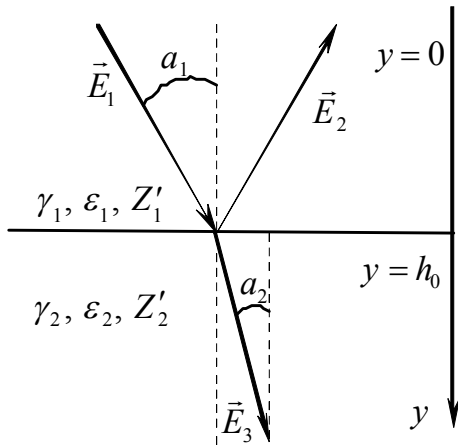


Рис. 2. Падение ЭМВ с перпендикулярной поляризацией под произвольным углом a_1 к границе раздела сред

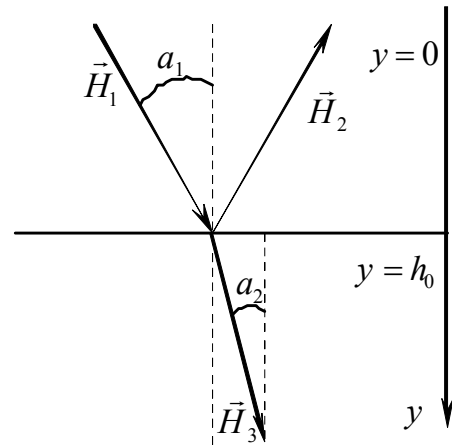


Рис. 3. Падение ЭМВ с параллельной поляризацией под произвольным углом a_1 к границе раздела сред

где γ_1, γ_2 – комплексные постоянные распространения в средах, ϵ_1, ϵ_2 – комплексные относительные диэлектрические проницаемости сред, Z'_1, Z'_2 – комплексные волновые сопротивления сред, $Z'_i = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_i}}$, $Z_o = 377 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление свободного пространства, h_0 – высота расположения антенны над средой.

Электромагнитное поле внутри первого слоя определяют падающей и отраженной волнами следующим образом

$$E(1) = E_1 + E_2 = E_{1m} e^{\gamma_1 y \cos a_1} + E_{2m} e^{-\gamma_1 y \cos a_1},$$

$$H(1) = H_1 - H_2 = \frac{\cos a_1}{Z'_1} E_{1m} e^{\gamma_1 y \cos a_1} - \frac{\cos a_1}{Z'_1} E_{2m} e^{-\gamma_1 y \cos a_1}.$$

Электромагнитное поле внутри второго слоя определяют только наличием проникающей волны, а именно:

$$E(2) = E_3 = E_{3m} e^{\gamma_2 y \cos a_2},$$

$$H(2) = H_3 = \frac{\cos a_2}{Z'_2} E_{3m} e^{\gamma_2 y \cos a_2}.$$

Пользуясь граничными условиями непрерывности электромагнитного поля на границе раздела сред [19]

$$\text{при } y = h_0 \quad \begin{cases} \epsilon_1 E(1) = \epsilon_2 E(2), \\ H(1) = H(2), \end{cases} \quad (1)$$

запишем систему уравнений относительно комплексных амплитуд электромагнитного поля первой и второй сред

$$\begin{cases} \varepsilon_1 (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0 \cos a_1} + E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0 \cos a_1}) = \varepsilon_2 E_{3m} e^{\gamma_2 h_0 \cos a_2}, \\ \frac{\cos a_1}{Z'_1} (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0 \cos a_1} - E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0 \cos a_1}) = \frac{\cos a_2}{Z'_2} E_{3m} e^{\gamma_2 h_0 \cos a_2}. \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему (2) относительно соотношения комплексных амплитуд электромагнитного поля E_{2m} / E_{1m} , получим следующее выражение для комплексного коэффициента отражения

$$R = \frac{E_{2m}}{E_{1m}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - a\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + a\sqrt{\varepsilon_1}} e^{2\gamma_1 h_0 \cos a_1}, \quad (3)$$

где $a = \frac{\cos a_2}{\cos a_1}$ – действительное число, a_1 – угол падения, $a_2 = \arccos \sqrt{1 - \frac{\sin^2 a_1}{|\varepsilon_2|}}$ – угол преломления.

С учетом $\varepsilon_1 = 1$ (первая среда является воздухом) и постоянной распространения отношение (3) запишем следующим образом

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - a}{\sqrt{\varepsilon_2} + a} e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) находим комплексную относительную диэлектрическую проницаемость среды ε_2

$$\varepsilon_2 = a^2 \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} + R}{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} - R} \right)^2. \quad (5)$$

Так как величины R, ε_2 являются комплексными, то из выражения (5) следует равенство действительных и мнимых частей комплексных чисел. Таким образом, запишем систему уравнений для нахождения действительной и мнимой части $\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2$

$$\varepsilon'_2 = \operatorname{Re} \left[a^2 \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} + R}{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} - R} \right)^2 \right], \quad \varepsilon''_2 = \operatorname{Im} \left[a^2 \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} + R}{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} - R} \right)^2 \right].$$

Произвольное падение ЭМВ с параллельной поляризацией

Рассмотрим случай произвольного падения ЭМВ с параллельной поляризацией на двухслойную структуру (рис. 3)

Выражения для падающей и отраженной волн в первой среде будут иметь следующий вид

$$\begin{aligned} E_1 &= \cos a_1 E_{1m} e^{\gamma_1 y \cos a_1}, \quad H_1 = \frac{E_{1m}}{Z'_1} e^{\gamma_1 y \cos a_1}, \\ E_2 &= \cos a_1 E_{2m} e^{-\gamma_1 y \cos a_1}, \quad H_2 = \frac{E_{2m}}{Z'_1} e^{-\gamma_1 y \cos a_1}. \end{aligned}$$

Электромагнитное поле внутри первого слоя определяют падающей и отраженной волнами следующим образом

$$E(1) = E_1 - E_2 = \cos a_1 E_{1m} e^{\gamma_1 y \cos a_1} - \cos a_1 E_{2m} e^{-\gamma_1 y \cos a_1},$$

$$H(1) = H_1 + H_2 = \frac{E_{1m}}{Z'_1} e^{\gamma_1 y \cos a_1} + \frac{E_{2m}}{Z'_1} e^{-\gamma_1 y \cos a_1}.$$

Электромагнитное поле внутри второго слоя определяют только проникающей волной в среде

$$E(2) = E_3 = \cos a_2 E_{3m} e^{\gamma_2 y \cos a_2},$$

$$H(2) = H_3 = \frac{E_{3m}}{Z'_2} e^{\gamma_2 y \cos a_2}.$$

Пользуясь граничными условиями непрерывности электромагнитного поля на границе раздела сред (1), запишем систему уравнений относительно комплексных амплитуд электромагнитного поля в средах

$$\begin{cases} \varepsilon_1 \cos a_1 (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0 \cos a_1} - E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0 \cos a_1}) = \varepsilon_2 \cos a_2 E_{3m} e^{\gamma_2 h_0 \cos a_2}, \\ \frac{1}{Z'_1} (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0 \cos a_1} + E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0 \cos a_1}) = \frac{E_{3m}}{Z'_2} e^{\gamma_2 h_0 \cos a_2}. \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему (6) относительно E_{2m}/E_{1m} , получим следующее выражение для комплексного коэффициента отражения

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - a\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + a\sqrt{\varepsilon_2}} e^{2\gamma_1 h_0 \cos a_1}. \quad (7)$$

При $\varepsilon_1 = 1$ отношение (7) запишем в виде

$$R = \frac{1 - a\sqrt{\varepsilon_2}}{1 + a\sqrt{\varepsilon_2}} e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}}. \quad (8)$$

Из выражения (8) находим комплексную диэлектрическую проницаемость среды ε_2

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{a^2} \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} - R}{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} + R} \right)^2.$$

Таким образом, систему уравнений для нахождения действительной и мнимой частей $\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2$ запишем в виде

$$\varepsilon'_2 = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{a^2} \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} - R}{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} + R} \right)^2 \right], \quad \varepsilon''_2 = \operatorname{Im} \left[\frac{1}{a^2} \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} - R}{e^{\frac{4\pi h_0 f \cos a_1}{c}} + R} \right)^2 \right].$$

Падение ЭМВ с перпендикулярной поляризацией под прямым углом

Рассмотрим случай падения ЭМВ с перпендикулярной поляризацией под прямым углом на двухслойную структуру (рис. 4).

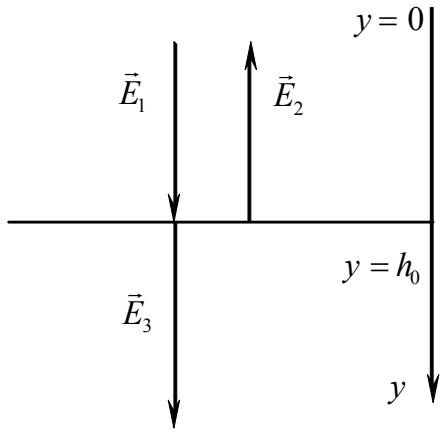


Рис. 4. Падение ЭМВ с перпендикулярной поляризацией под прямым углом к границе раздела сред

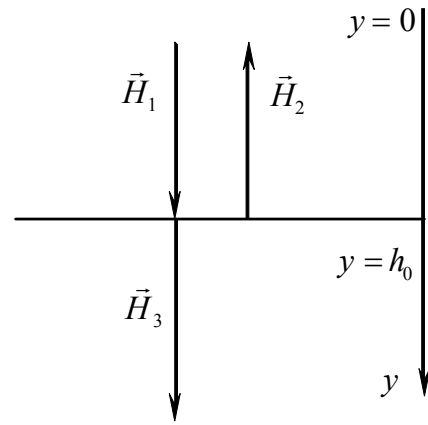


Рис. 5. Падение ЭМВ с параллельной поляризацией под прямым углом к границе раздела сред

Запишем выражения для падающей и отраженной волн в первой среде

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1m} e^{\gamma_1 y}, \quad H_1 = \frac{E_{1m}}{Z'_1} e^{\gamma_1 y}, \\ E_2 &= E_{2m} e^{-\gamma_1 y}, \quad H_2 = \frac{E_{2m}}{Z'_1} e^{-\gamma_1 y}. \end{aligned} \quad (9)$$

Электромагнитное поле внутри первого слоя определяют падающей и отраженной волнами в первой среде

$$\begin{aligned} E(1) &= E_1 + E_2 = E_{1m} e^{\gamma_1 y} + E_{2m} e^{-\gamma_1 y}, \\ H(1) &= H_1 - H_2 = \frac{E_{1m}}{Z'_1} e^{\gamma_1 y} - \frac{E_{2m}}{Z'_1} e^{-\gamma_1 y}. \end{aligned}$$

Электромагнитное поле внутри второго слоя описывают выражением для проникающей волны во второй среде

$$\begin{aligned} E(2) &= E_3 = E_{3m} e^{\gamma_2 y}, \\ H(2) &= H_3 = \frac{E_{3m}}{Z'_2} e^{\gamma_2 y}. \end{aligned} \quad (10)$$

Пользуясь граничными условиями непрерывности электромагнитного поля (1), запишем систему уравнений относительно комплексных амплитуд электромагнитного поля

$$\begin{cases} \varepsilon_1 (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0} + E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0}) = \varepsilon_2 E_{3m} e^{\gamma_2 h_0}, \\ \frac{1}{Z'_1} (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0} - E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0}) = \frac{1}{Z'_2} E_{3m} e^{\gamma_2 h_0}. \end{cases} \quad (11)$$

Решая систему (11) относительно E_{2m} / E_{1m} , получим выражение для комплексного коэффициента отражения

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} e^{2\gamma_1 h_0}. \quad (12)$$

При $\varepsilon_1 = 1$ выражение (12) запишем следующим образом

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - 1}{\sqrt{\varepsilon_2} + 1} e^{-\frac{4\pi h_0 f}{c}}. \quad (13)$$

Из выражения (13) найдем относительную диэлектрическую проницаемость ε_2

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} + R}{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} - R} \right)^2.$$

Таким образом, систему уравнений для нахождения действительной и мнимой частей $\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2$ запишем в виде

$$\varepsilon'_2 = \operatorname{Re} \left[\left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} + R}{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} - R} \right)^2 \right], \quad \varepsilon''_2 = \operatorname{Im} \left[\left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} + R}{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} - R} \right)^2 \right].$$

Падение ЭМВ с параллельной поляризацией под прямым углом

Рассмотрим случай падения ЭМВ с параллельной поляризацией под прямым углом на двухслойную структуру (рис. 5).

Выражения для падающей и отраженной волн в первой среде определяют равенством (9). Электромагнитное поле внутри первого слоя определяется падающей и отраженной волнами в первой среде следующим образом

$$\begin{aligned} E(1) &= E_1 - E_2 = E_{1m} e^{\gamma_1 y} - E_{2m} e^{-\gamma_1 y}, \\ H(1) &= H_1 + H_2 = \frac{E_{1m}}{Z'_1} e^{\gamma_1 y} + \frac{E_{2m}}{Z'_1} e^{-\gamma_1 y}. \end{aligned}$$

Электромагнитное поле внутри второго слоя определяют выражением (10).

Пользуясь граничными условиями непрерывности электромагнитного поля (1), записываем систему уравнений относительно комплексных амплитуд электромагнитного поля

$$\begin{cases} \varepsilon_1 (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0} - E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0}) = \varepsilon_2 E_{3m} e^{\gamma_2 h_0}, \\ \frac{1}{Z'_1} (E_{1m} e^{\gamma_1 h_0} + E_{2m} e^{-\gamma_1 h_0}) = \frac{1}{Z'_2} E_{3m} e^{\gamma_2 h_0}. \end{cases} \quad (14)$$

Решая систему (14) относительно E_{2m}/E_{1m} , получим выражение для комплексного коэффициента отражения

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} e^{2\gamma_1 h_0}. \quad (15)$$

При $\varepsilon_1 = 1$ выражение (15) принимает вид

$$R = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_2}}{1 + \sqrt{\varepsilon_2}} e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}}. \quad (16)$$

Из выражения (16) находим относительную диэлектрическую проницаемость ε_2 следующим образом

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} - R}{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} + R} \right)^2.$$

Тогда систему уравнений для нахождения действительной и мнимой частей $\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2$

запишем в виде

$$\varepsilon' = \operatorname{Re} \left[\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} - R}{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} + R} \right], \quad \varepsilon_2'' = \operatorname{Im} \left[\frac{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} - R}{e^{\frac{4\pi h_0 f}{c}} + R} \right].$$

Таким образом, при заданном значении коэффициента отражения и соответствующей ему частоте мы нашли комплексную относительную диэлектрическую проницаемость среды ε_2 .

Выводы

В работе предложена математическая модель метода восстановления параметров биологических сред по функции коэффициента отражения радиоволн. Проведено исследование частотной зависимости коэффициента отражения на основе рассмотрения двухслойной модели биологической среды для четырех случаев падения электромагнитной волны на границу раздела сред.

Показано, что в случае двухслойной модели определение диэлектрической проницаемости среды возможно при известном значении частоты. Из приведенных выше соотношений видно, что значение комплексного коэффициента отражения по напряжению зависит не только от параметров исследуемой среды, но и от поляризации и угла падения электромагнитной волны.

Данный метод может быть применен в диагностике опухолевых заболеваний, поскольку он не требует хирургического вмешательства и является полностью безопасным. В дальнейшем планируем разработать математическую модель метода определения распределения температуры в биологической ткани, в которой будут использованы результаты данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепнев И. А. Биологические эффекты при воздействии электромагнитных волн. / И. А. Черепнев // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – № 3. – С. 118 – 124.
2. Басанов Б. В. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога. / Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 4. – С. 34 – 40.
3. Болтинцев В. Б. Определение диэлектрических свойств сложных грунтов при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды / В. Б. Болтинцев // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 11. – С. 25 – 28.
4. Болтинцев В. Б. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 1. – С. 1 – 39.
5. Мутнян В. О. Теоретичний аналіз впливу низькоенергетичного електромагнітного випромінювання на стан біооб'єктів / В. О. Мутнян, О. В. Лисенко, Д. М. Коваль // Праці ТДАТУ. – 2011. – Т. 3. – № 11. – С. 14 – 19.
6. Плахотник В. Ю. Сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса и контроль диэлектрических свойств биологических сред / В. Ю. Плахотник, Г. А. Поляков, Г. А. Долинский // Вісник СевНТУ. – 2009. – №. 99. – С. 82 – 85.
7. Резник А. Н. Ближнепольная СВЧ томография биологических сред / А. Н. Резник, Н. В. Юрасова // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74. – №. 4. – С. 108 – 117.
8. Резник А. Н. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ диагностики / А. Н. Резник, Н. В. Юрасова // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – № 1. – С. 90 – 104.
9. Резник А. Н. Радиационные эффекты в ближнепольной сверхвысокочастотной диагностике / А. Н. Резник, И. А. Шерешевский, Н. К. Вдовичева // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – № 6. – С. 656 – 664.
10. Арсеньев А. В. Применение метода ВЧ-ближнепольного зондирования в диагностике биообъектов / А. В. Арсеньев, А. Н. Волченко, Л. В. Лихачева, В. И. Печерский // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 2 (72). – С. 154 – 157.
11. Балашин Ю. А. Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов / Ю. А. Балашин, А. А. Сорокин, А. В. Арсеньев, М. Г. Дудин, А. Н. Волченко // Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 37 – 43.

12. Моденов В. П. Волноводно-резонансный метод в СВЧ диэлектрометрии / В. П. Моденов // Вестник новых медицинских технологий. – 1996. – Т. 3. – № 1. – С 17 – 19.
13. Моденов В. П. Метод интегральных уравнений в задаче волноводного электромагнитного зондирования биообъектов / В. П. Моденов, И. К. Трошина // Вестник новых медицинских технологий. – 1998. – Т. 5. – № 3 – 4. – С. 106 – 108.
14. Моденов В. П. Метод Галеркина в задаче волноводного электромагнитного зондирования биообъектов / В. П. Моденов, В. В. Конюшенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1998. – Т. 3. – № 4. – С. 43 – 46.
15. Моденов В. П. Математическое моделирование волноводного электромагнитного зондирования биологических объектов / В. П. Моденов, И. К. Трошина, В. В. Конюшенко // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. – № 5 – 6. – С. 67 – 72.
16. Мериакри В. В. Диэлектрические свойства растворов глюкозы в миллиметровом диапазоне волн и проблема контроля ее содержания в крови / В. В. Мериакри, Е. Е. Чиграй, И. П. Никитин, М. П. Пархоменко // Международная конференция Крымико. – 2005. – С. 853 – 854.
17. Манойлов В. П. Ближньопольова НВЧ-взаємодія «антена-середовище» / В. П. Манойлов, Л. Ю. Назарчук // Вісник ЖДТУ. – 2005. – № 2 (33). – С. 75 – 79.
18. Назарчук Л. Ю. Відновлення параметрів біологічних середовищ за функцією коефіцієнта відбиття / Л. Ю. Назарчук // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 1 (36). – С. 65 – 74.
19. Гольдштейн Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов. – М.: Сов. Радио, 1971. – 664 с.

Манойлов Вячеслав Филиппович – д. т. н., проф., заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций, Lnazarchuk@rambler.ru.

Назарчук Леся Юрьевна – соискатель, Lnazarchuk@rambler.ru.
Житомирский государственный технологический университет.