(cc) BY 4.0

Научная статья УДК 621.317.341.3; 53.096; 53.093 https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-36-45

Оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости S-параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах

© Виталий Николаевич Невежин [⊠], vitalayzerman@mail.ru [©] Максим Евгеньевич Комнатнов, maxmek@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Обеспечение надежной и бесперебойной радиосвязи критически важно при изменении климатических условий ее эксплуатации. Совместное воздействие температуры и влажности воздуха может привести к изменению электрических характеристик приемопередающих устройств и тем самым нарушить канал связи. В сложных климатических условиях эксплуатации, за счет постоянного изменения температуры на поверхности входящих в состав печатных плат (ПП) может образовываться конденсат, влияющий на работоспособность всего устройства. В этой связи электрические характеристики изменяются, что необходимо учитывать при проектировании критичной радиоэлектронной аппаратуры. Следовательно, целесообразна оценка климатических воздействий на линии передачи, расположенные на печатных платах в широком диапазоне частот, что требует разработки новых моделей и методик.

Цель работы: оценить влияние температуры тонкой пленки воды на поверхности микрополосковой линии передачи (МЛП) на ее частотные зависимости S-параметров с помощью **методов** конечных элементов и лабораторных экспериментов.

Результаты. Представлена методика учета воздействия температуры и влажности окружающей среды на электрические характеристики МЛП, позволяющая оценить изменение S-параметров линии в широких диапазонах частот, температур и влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды. Измерены S-параметры воды в контейнере, размещенном внутри коаксиальной камеры, в диапазонах частот и температур от 10 МГц до 12 ГГц и от −50 до 100 °С, соответственно. Используя представленную модель, вычислены частотные зависимости электропроводности воды при разных температурах. Показано, что при положительной температуре электропроводность может достигать 6,5 См/м, а при отрицательной –1,3 См/м. Разработанная методика позволяет оценить влияние различной электропроводности воды на S-параметры МЛП. Показано влияние толщины слоя воды и льда на Sпараметры МЛП. Выявлено, что модели, описывающие электропроводность воды, оказывают отличное влияние на электрические параметры линии передачи. Новизна: представлена методика учета влияния температуры и влажности окружающей среды на S-параметры линии передачи, отличающаяся использованием модели электропроводности воды на основе вносимых потерь, вычисленных из измеренных Sпараметров коаксиальной камеры с водой в контейнере при изменении ее температуры. Практическая значимость представленной модели и методики позволяет оценить S-параметры линии в широких диапазонах частот, температур и влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды.

Ключевые слова: коаксиальная камера, вода, температурные измерения, S-параметры, электропроводность

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Ссылка для цитирования: Невежин В.Н., Комнатнов М.Е. Оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости *S*-параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 24–33. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-36-45. EDN:EORDYI Original research https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-36-45

Evaluation the Influence of Thin Film of Water on the Frequency Dependences of Transmission Line S-Parameters at Positive and Negative Temperatures

^{ID} Vitaliy N. Neveznin ^{IZI}, vitalayzerman@mail.ru I^D Maksim E. Komnatnov, maxmek@mail.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation

Annotation

Relevance. Provision of reliable and uninterrupted radio communication is critically important under changing climatic conditions of its operation. The combined effect of temperature and humidity can lead to changes in the electrical characteristics of transceiving devices and thereby disrupt the communication channel. In difficult climatic conditions of operation, due to constant temperature changes on the surface of the printed circuit boards, which are part of them, condensation can form, affecting the performance of the entire device. In this regard, the electrical characteristics change, which must be taken into account when designing critical REE. When designing transmission lines on printed circuit boards, it is reasonable to evaluate climatic impacts on it in a wide frequency range, which requires the development of new models and methods that allow taking into account these impacts.

Goal of the work: to evaluate the influence of the temperature of a thin film of water on the surface of a microstrip transmission line on its frequency dependences of S-parameters. Finite element methods and laboratory experiment were used.

Results. A methodology to account for the effects of ambient temperature and humidity on the electrical characteristics of a microstrip transmission line (MTL) is presented, which allows evaluating the variation of the Sparameters of the line over wide ranges of frequencies, air temperature and humidity, as well as the chemical composition of the environment. The S-parameters of water in a container placed inside a coaxial chamber are measured over the frequency and temperature ranges of 10 MHz to 12 GHz and minus 50 to 100°C, respectively. Using the presented model, the frequency dependences of the electrical conductivity of water at different temperatures are calculated. It is shown that at positive temperature, the electrical conductivity can reach 6.5 Sm/m and at negative temperature it can reach 1.3 Sm/m. Using the developed methodology, the influence of different water electrical conductivity on the S-parameters of MTLs is evaluated. The influence of water and ice layer thickness on the Sparameters of MTLs was shown. It is found that models describing the electrical conductivity of water have an excellent influence on the electrical parameters of the transmission line. **Novelty**. A method of accounting for the influence of ambient temperature and humidity on the S-parameters of the transmission line is presented, which is characterized by the use of a model of water conductivity based on insertion losses calculated from the measured Sparameters of a coaxial chamber with water in the container when its temperature is changed.

Practical significance: a model and a methodology for taking into account the impact of temperature and humidity of the environment on the MTL characteristics are presented, allowing estimating the S-parameters of the line in a wide range of frequencies, air temperature and humidity, as well as the chemical composition of the environment.

Keywords: coaxial cell, water, temperature measurements, S-parameters, electrical conductivity

Funding: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEWM2024-0005.

For citation: Neveznin V.N., Komnatnov M.E. Evaluating the Influence of Thin Film of Water on the Frequency Dependences of Transmission Line S-Parameters at Positive and Negative Temperatures. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2024;10(5):24–33. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-36-45. EDN:EORDYI

Введение

Обеспечение бесперебойной связи в сложных климатических условиях крайне важно. Воздействие температуры и влажности на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) средств связи, оказывает различное влияние на их электрические характеристики из-за растворенных в воде веществ. Различия в солености морей отличает воду по электрофизическим параметрам [1]. Конденсация воды с неодинаковым химическим составом на линии передачи, расположенных на печатных платах (ПП) может оказать различное влияние на ее электрические характеристики.

РЭА содержит множество различных компонентов, расположенных на ПП. Воздействие температуры (T, °C) и влажности воздуха на ПП с компонентами может привести к изменению ее электрических характеристик и преждевременным отказу или сбою. В жестких условиях эксплуатации РЭА ее компоненты могут нагреваться или охлаждаться, что создает градиент температур вокруг них и вызывает конденсацию воды внутри корпуса. Это влияет на производительность РЭА и потребление ею электроэнергии [2-4]. При влажности воздуха более 50 % возникает риск конденсации воды на поверхности ПП в виде тонкой водяной пленки, влияющей на ее работоспособность [5]. Установлено [6], что при влажности воздуха до 70 % возможность выхода из строя РЭА минимальна, при влажности свыше 85 % - более вероятна, а при 100 % вода появляется на ПП, и риск отказа РЭА максимален. В этой связи четверть всех отказов РЭА связана с влажностью, а половина непосредственно с температурой [7].

В зависимости от агрегатного состояния воды изменяется ее комплексная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$), включающая электропроводность (σ) и относительную диэлектрическую проницаемость (ɛ_r) [8, 9], различно влияющие на электрические характеристики компонентов РЭА. Так, при образовании на микрополосковой антенне воды в жидком или твердом агрегатных состояниях, ее основная частота смещается, в связи с изменением ε_r воды в жидком ($\varepsilon_r \approx 80$) и в твердом $(\varepsilon_r \approx 3,2)$ агрегатных состояниях [10]. Спиральные антенны на ПП могут использоваться в летательных аппаратах, а появление конденсата в различных местах на антенне снижает их эффективность и вносит помехи на низких и высоких частотах в зависимости от места появления конденсата, что ослабляет амплитуду полезного сигнала по сравнению с уровнем помех [11].

В результате на начальных этапах проектирования необходимо учитывать изменения электрофизических параметров воды от температуры при оценке воздействия влажности на ПП с компонентами, что позволит снизить риск отказа узла или блока критичной РЭА, а также повысить их надежность. Подобную оценку можно провести с помощью модели, описывающей электрические свойства тонкой пленки воды от температуры, расположенной на поверхности ПП. Используя параметрическую модель Коул-Коула [12, 13], оценивают частотную зависимость о для разных жидкостей от температуры. Измерение о жидкостей (до 2,5 См/м) проводят в диапазоне частот 0,01-1 МГц, используя емкостную ячейку [14, 15]. При этом не существует однозначной электрофизической модели воды, учитывающей воздействие температуры, а известные применяются при определенных условиях [16].

Таким образом, необходимо учитывать изменение электрических характеристик в широких диапазонах температур, частот и влажности воздуха, что актуально при проектировании критичной РЭА, эксплуатируемой в сложных климатических условиях. Целью работы является оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости *S*параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах.

Модель для оценки электропроводности воды в коаксиальной камере на основе измерения ее S-параметров при разных температурах

Разработана модель для оценки о воды, основанная на вычислении уровня вносимых потерь (ВП), используя измеренные частотные зависимости *S*-параметров коаксиальной камеры с водой при изменении ее температуры.

ВП водой вычисляются из измеренных частотных зависимостей ненагруженной (пустая камера) (|S₂₁*u*|) и нагруженной (камера с материалом) (|S₂₁*L*|) коаксиальной камеры [17] как:

$$B\Pi = 20 \lg(|S_{21U}| / |S_{21L}|).$$
(1)

Равномерное распределение воды в центре коаксиальной камеры возможно выполнить при использовании дополнительной конструкции, которая является плоским контейнером из материала с ε_r ≈ 2. ВП могут быть вычислены для пустого контейнера (ВП' = $|S_{21U}| / |S_{21\Pi K}|$) и заполненного (ВП'' = = |S₂₁*u*| / |S₂₁₃*k*|) через значения |S₂₁| для пустой камеры (|S21U|) и с пустым контейнером (|S21пк|), а также камеры с контейнером, заполненным водой (|S_{213K}|). ВП воды без учета контейнера могут быть вычислены через отношение ВП" / ВП'. При этом ВП водой, вычисленные по (1), могут быть приравнены к ВП для нагруженной материалом коаксиальной камеры, аналогично учитывающем тепловые потери и потери на отражения согласно [18], вычисленным по выражению:

$$B\Pi = 20 \lg (1 + 0.5 Z \sigma d), \tag{2}$$

где *Z* – характеристическое сопротивление коаксиальной камеры; *d* – толщина воды в контейнере.

При известных ВП для воды из (2) можно получить о воды в коаксиальной камере:

$$\sigma = \left(\left| \frac{S_{21 \text{ IK}}}{S_{21 \text{ 3K}}} \right| - 1 \right) \frac{2}{Zd}.$$
 (3)

В результате измеренные *S*-параметры пустой коаксиальной камеры и камеры с полым и заполненным водой контейнером при разных температурах позволят вычислить о воды при разных ее температурах или агрегатных состояниях.

Измерение S-параметров коаксиальной камеры с водой при изменении ее температуры

Для измерения частотных зависимостей *S*-параметров коаксиальной камеры (рисунок 1а) с водой создан контейнер цилиндрической формы объемом 5 мл из тефлона ($\varepsilon_r = 2,1$) с одинаковыми толщинами (t = 2 мм) стенок и крышки (рисунок 1b). Тефлон выбран, поскольку обладает химически инертными свойствами и не деформируется, а его электрические свойства практически не изменяются в широком диапазоне температур. Объем 5 мл выбран на основе [19] для меньшего влияния стенок контейнера на результаты измерения *S*параметров коаксиальной камеры с водой.





b) Рис. 1. Коаксиальная камера (а) с контейнером объемом 5 мл (b) Fig. 1. Coaxial Cell (a) with 5 ml Container (b)

Измерения *S*-параметров проводились при помощи установки, схема (рисунок 2а) которой содержит векторный анализатор цепей (ВАЦ): внешний (1) и внутренний (2) проводники коаксиальной камеры, с размещенным внутри нее контейнером (3), заполненным водой (4). Коаксиальная камера размещается внутри камеры «теплохолод» (5). Собрана установка (рисунок 2b), содержащая ВАЦ Rohde & Schwarz ZVA 40 1, камеру «тепло-холод» ESPEC SU-262 2 и коаксиальную камеру (3) с верхней граничной частотой 12 ГГц [20]. Измерения частотных зависимостей *S*-параметров коаксиальной камеры с водой проводились в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц каждые 30 с, используя ВАЦ. Толщина воды (*d*) в контейнере 5 мл составляла 10 мм. Температура внутри камеры «тепло-холод» изменялась в двух диапазонах: от 25 до 100 °С и от 25 до -50 °С. Стенки контейнера герметизировались в местах стыка для устранения протекания воды под воздействием высоких температур.



Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (b) установки для измерения частотных зависимостей *S*-параметров коаксиальной камеры с водой при изменении температуры

Fig. 2. Schematic (a) and External View (b) of the Installation for Measuring Frequency Dependencies of S-Parameters in a Coaxial Cell with Water during Temperature Changes

Частотные зависимости *S*-параметров пустой коаксиальной камеры и при размещении внутри нее полого контейнера объемом 5 мл представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Частотные зависимости |S₂₁| пустой (1) коаксиальной камеры и с контейнером объемом 5 мл (2)

Из рисунка 3 видно, что для пустой камеры и с полым контейнером различия в значениях |S₂₁| незначительны (до 0,5 дБ) до частоты 10 ГГц. Свыше 10 ГГц разница увеличивается и достигает 1,5 дБ у 12 ГГц. В результате контейнеры минимально влияют на частотную зависимость |S₂₁| коаксиальной камеры.

Измерены частотные зависимости *S*-параметров коаксиальной камеры с размещенным внутри нее пластиковым контейнером объемом 5 мл, заполненным водой, и при изменении температуры от минус 50 до 100 °C с шагом 25 °C (рисунок 4).



от -50 до 100 °C

Fig. 4. Frequency Dependences $|S_{21}|$ of the Coaxial Cell with Water in the Container When Their Temperature Changes from –50 to 100 $\,\%$

Вода в жидком состоянии больше влияет на $|S_{21}|$ при положительных температурах, чем при отрицательных. Так, при 25 и 50 °С – изменения $|S_{21}|$ более 1 дБ. С ростом температуры с 50 до 100 °С $|S_{21}|$ существенно изменяется (свыше 3 ГГц), а на частотных зависимостях появляются более частые осцилляции $|S_{21}|$. Минимум $|S_{21}|$ при T = 75 °С составляет –11 дБ и –14 дБ при T = 100 °С (на частотах 4–5 ГГц). Охлаждение воды до T = 0 °С повышает $|S_{21}|$ до –8 дБ, при T = -25 °С – до –3 дБ, тогда как при T = -50 °С до –2 дБ. Это показывает, что температура сильно влияет на $|S_{21}|$. В результате отрицательные температуры минимально влияют на $|S_{21}|$, а при положительных температурах $|S_{21}|$ снижается. При этом, чем выше температура, тем меньше разница по частоте между узлами и пучностями на частотных зависимостях |*S*₂₁|.

Вычисление уровня вносимых потерь

На основе измеренных частотных зависимостей *S*-параметров коаксиальной камеры с водой в контейнере 5 мл вычислены ВП водой при различных температурах (1) и интерполированы полиномом 4-й степени (рисунок 5). Температура существенно влияет на ВП. Так, при 25–100 °С и с ростом частоты значение ВП растет до 10 дБ. При уменьшении температуры до 0 °С максимум ВП снижается до 8 дБ, а при температуре –25 и –50 °С – до 3 и 2 дБ, соответственно.



Fig. 5. Frequency Dependences of Insertion Loss (IL) at Different Water Temperatures

Низкий уровень ВП (см. рисунок 5) связан с тем, что при отрицательных температурах вода переходит в твердое агрегатное состояние, что значительно изменяет ее электрофизические параметры (σ и ε_r).

Вычисление удельной электропроводности воды

Вычислены по (1–3) частотные зависимости σ (рисунок 6а) и аппроксимированы полиномом 4-й степени (рисунок 6b). Полученные частотные зависимости σ воды сравнены со значениями из [21, 22], измеренными при *T* = 25 °C до частоты 7 ГГц.

Из рисунка ба видно, как температура влияет на частотную зависимость о. Так, максимум о составляет 12 См/м при T = 100 °С на частоте 4,9 ГГц, а минимум – $\sigma \approx 1$ См/м при T = -50 °С на частоте 12 ГГц. При аппроксимации зависимостей σ можно заметить (см. рисунок 6b), что они близки по поведению к зависимостям из [21, 22] до 6 ГГц. Так, σ увеличивается до 6,5 См/м при T = 25 °C с ростом частоты до 7 ГГц, а при T = 0 °С – до 4,8 См/м. Свыше 6 ГГц наблюдается незначительный спад, а затем рост о. Отрицательные температуры: -25 и -50 °С незначительно его увеличивают до 1,3 и 0,8 См/м, соответственно. Разница значений σ составляет 1 См/м в диапазоне температур от 25 до 100 °С, и увеличивается до 1,8 См/м при температуре около 0 °С, а для отрицательных температур составляет 0,5 См/м.

Fig. 3. Frequency Dependences |S₂₁| of an Empty (1) Coaxial Cell and with a 5 ml Container (2)



Рис. 6. Частотные зависимости σ без аппроксимации (a) и с ней (b) при изменении температуры от –50 до 100 °C воды в контейнере

Fig. 6. Frequency Dependences of σ without Approximation (a) and with it (b) at Temperature Change from –50 to 100 °C of Water in the Container

Влияние пленки воды на *S*-параметры микрополосковой линии передачи

Учет влияния воды на *S*-параметры МЛП может быть выполнен следующим образом:

1) измерить частотные зависимости *S*-параметров коаксиальной камеры с водой, размещенной внутри контейнера в заданном диапазоне температур, например, от –50 до 100 °C;

2) вычислить частотные зависимости ВП и σ по выражениям (1–3);

 создать геометрическую модель линии передачи;

 создать геометрическую модель тонкой пленки с возможностью варьирования по толщине слоя;

5) учесть в геометрической модели пленки воды частотные зависимости σ при разных температурах;

6) используя численный метод, вычислить Sпараметры линии передачи с учетом разных толщин и σ пленки воды;

7) проанализировать частотные зависимости *S*-параметров линии передачи с пленкой воды;

8) при необходимости добавить температурные зависимости электрофизических параметров проводника и диэлектрика линии передачи и повторить вычисления *S*-параметров;

9) принять меры по ослаблению влияния температуры и влажности на *S*-параметры линии передачи.

Используя предложенную выше методику, оценено влияние влажности на *S*-параметры микро-

полосковой линии передачи (МЛП). Для этого выбрана МЛП с Z_e = 50 Ом и параметрами: ε_{r1} = 4,3, *w* = 3 мм, *t*₁ = 35 мкм, *h*₁ = 1,6 мм и длиной 60 мм (рисунок 7). Температурные зависимости электрофизических параметров проводника и диэлектрика МЛП в данной работе не учитывались. МЛП покрывалась пленкой воды толщиной $h_2 = 1$ мм, имеющем электрофизические параметры модели дистиллированной ($\varepsilon_r = 78,4$ и $\sigma = 5,6$ мкСм/м) и чистой воды (ε_r = 78 и σ = 1,59 См/м). Также использовались частотная зависимость по модели Дебая со значениями єг в диапазоне от 78 до 58 и σ – от 0 до 25 См/м в диапазоне частот до 12 ГГц. Создана модель воды на основе измеренных и вычисленных значений σ (см. рисунок 6b) при $T = 25 \,^{\circ}\text{C}$, а значение $\varepsilon_r = 80$ было постоянным во всем диапазоне частот.



Используя полученные геометрические и электрические параметры МЛП без слоя и со слоем воды, вычислены частотные зависимости *S*-параметров (рисунок 8) методом конечных элементов (МКЭ). Пленка воды на поверхности МЛП значительно влияет на *S*-параметры.



Рис. 8. Частотные зависимости |S₁₁| (а) и |S₂₁| (b) МЛП без (1) и со слоем дистиллированной (2) и чистой (3) воды, с использованием моделей Дебая (4) и на основе ВП (5)

Fig. 8. Frequency Dependences of $|S_{11}|$ (a) and $|S_{21}|$ (b) of the MTL without (1) and with a Layer of Distilled (2) and Pure (3) Water, Debye (4) and Using IL-Based (5) Models Так, если без воды $|S_{11}| < -20 \text{ дБ}$ до частоты 6 ГГц, то с водой $|S_{11}| < -2 \text{ дБ}$, что приводит к рассогласованию МЛП на всех частотах при наличии на ней воды. Видно, что с ростом частоты $|S_{21}|$ без воды изменяется от 0 до -1,2 дБ, тогда как с водой – от 0 до -58 дБ.

Использование разных моделей воды различно влияет на *S*-параметры МЛП. Так, до 3 ГГц $\Delta|S_{21}|$ может составлять 5 дБ, тогда как в диапазоне 6,5–12 ГГц достигает 30 дБ, что подтверждает необходимость в использовании корректной модели воды на этапе проектирования МЛП и ПП в целом. Например, значения *S*-параметров для дистиллированной воды, затем чистой воды, далее созданной модели воды и модели по Дебаю отличаются. В результате можно предположить, что, чем больше о воды, тем меньше $|S_{21}|$. Наибольшее отличие *S*-параметров МЛП с водой получено по модели Дебая. Поэтому выполнена оценка влияния толщины слоя воды при использовании модели Дебая и экспериментальной модели воды.

Моделировались частотные зависимости *S*параметров при помощи МКЭ с разной толщиной пленки воды (h_2): 1; 0,5; 0,35 мм, используя модели Дебая и экспериментальную (рисунок 9).



Рис. 9. Частотные зависимости $|S_{21}|$ МЛП с разной толщиной пленки воды, используя модели на основе ВП (а) и Дебая (b) Fig. 9. Frequency Dependences of $|S_{21}|$ of the MTLs with Various Water Layer Thicknesses Obtained Using IL-Based (a) and Debye (b) Models

Модель на основе ВП показала, что при уменьшении h_2 от 1 до 0,35 мм минимумы $|S_{21}|$ повышаются от –56 до – 39 дБ и растут по частоте с 5–6 до 10–11 ГГц (см. рисунок 9а). По модели Дебая минимумы значения $|S_{21}|$ уменьшаются от –53 до -74 дБ и растут по частоте с 5-6 до 9-10 ГГц (см. рисунок 9b).

В результате модель Дебая оказывает большее влияние на $|S_{21}|$, по сравнению с моделью воды на основе ВП, что может быть связано с высоким значением о у модели Дебая по сравнению с другими моделями. Толщина пленки воды влияет на $|S_{21}|$ как по амплитуде, так и по частоте, и чем она больше, тем частота среза меньше, а крутизна $|S_{21}|$ выше. Так, при увеличении толщины пленки воды от 0,35 до 1 мм частота среза смещается с 3 до 1,7 ГГц, что приводит к необходимости герметизировать устройства СВЧ в РЭА или учитывать влияние влажности при проектировании, например, заменив несимметричную на симметричную МЛП.

Влияние пленки льда на S-параметры микрополосковой линии передачи

Отрицательная температура окружающей среды образует из воды лед, что иначе влияет на Sпараметры МЛП и электрические характеристики ПП в целом. Кроме того, конденсируемая вода на ПП может содержать разные примеси, что оказывает влияние на модель воды. При моделировании предполагается, что для моделей значение *ε*_{r2} не изменяется и составляет 3,2 во всем диапазоне частот, а значения о различны для моделей чистого ($\sigma = 0 \text{ См/м}$) и электропроводящего ($\sigma = 1 \text{ См/м}$) льда и не зависят от частоты. На основе вычисленных по ВП значений σ воды при $T = -50 \,^{\circ}\text{C}$ (см. рисунок 6b) создана модель для льда. Используя МКЭ, вычислены частотные зависимости Sпараметров разных моделей льда при его толщине $h_2 = 1$ мм (рисунок 10). Значения $|S_{11}|$ вне зависимости от модели льда больше уровня в -20 дБ, тем самым лед влияет на электрические характеристики МЛП. С ростом частоты |S₂₁| уменьшается вне зависимости от модели воды (рисунок 10b). Разница значений между МЛП и с учетом пленки чистого и на основе ВП льда составляет -1 дБ, а с пленкой электропроводящего льда – от 1 до 12 дБ. В результате пленка чистого льда минимально влияет на |*S*₂₁| МЛП.

Моделировались частотные зависимости $|S_{21}|$ для разных моделей льда (рисунок 11) при изменении h_2 : 1; 0,5; 0,35 мм), используя МКЭ. Толщина льда на МЛП, не зависимо от модели, влияет на минимум значение $|S_{21}|$. Для всех моделей льда есть разница между значениями $|S_{21}|$, например, при толщине льда 1 и 0,5 мм она составляет от 0,2 до 3 дБ, тогда как для 0,5 и 0,35 мм – от 0,1 до 1 дБ. Для модели чистого льда при толщине 1 мм с ростом частоты $|S_{21}|$ уменьшается, но добавляются дополнительные осцилляции. При этом с ростом частоты амплитуда осцилляций увеличивается.



Рис. 10. Частотные зависимости |S₁₁| (а) и |S₂₁| (b) МЛП (1) с использованием моделей чистого (2), на основе ВП (3) и электропроводящего (4) льда

Fig. 10. Frequency Dependences of |S11| (a) and |S21| (b) of the MTL (1) Using Pure (2), IL-Based (3), and Electrically Conductive (4) Ice Models



Рис. 11. Частотные зависимости |S₂₁| МЛП с использованием моделей чистого (а), электропроводящего (b) и на основе ВП (с) льда разной толщины

Fig. 11. Frequency Dependences of |S₂₁| of the MTLs Obtained Using Pure (a), Electrically Conductive (b), and Experimental (c) Ice Models of Varying Thickness

Выявлено, что для модели МЛП с пленкой чистого льда изменения |S₂₁| не превышают 3 дБ. Тогда как для модели на основе (3) увеличение пленки льда – от 0,35 до 1 мм, смещает с 6 до 5,1 ГГц частоту среза, а для модели электропроводящего льда – с 1 до 0,2 ГГц. В результате повышенная концентрация химических веществ с влажностью в окружающей среде и при резком снижении температуры может привести к появлению льда с высокой электропроводностью на поверхности МЛП, что приведет к ослаблению (≥3 дБ) в ней сигналов на частотах свыше 200 МГц.

Заключение

В результате представлена методика для учета воздействия температуры и влажности на электрические характеристики линии передачи на ПП, позволяющая оценить изменение ее S-параметров в широких диапазонах частот, влажности и температуры воздуха с учетом химического состава окружающей среды, что в дальнейшем позволит при проектировании ПП оценить устойчивость приемопередающих устройств к дестабилизирующему воздействию. Для этих целей измерены Sпараметры воды в диапазонах частот от 10 МГц до 12 ГГц и температур от -50 до 100 °С. Показано, что температура существенно влияет на частотные зависимости S-параметров воды при ее нагреве до 100 °С и охлаждении до -50 °С. Выявлено, что с ростом температуры растут ВП, а при отрицательной температуре они уменьшаются. Модель для вычисления σ воды на основе измеренных Sпараметров отличается вычислением уровня ВП воды в коаксиальной камере при изменении ее температуры. Разница с известными значениями σ не превышает при отрицательных температурах 0,5 См/м, а при положительных - 1,8 См/м. Высокая разница σ может быть связана с недостатком предлагаемой модели, что в дальнейшем будет более детально экспериментально исследовано на ПП, покрытых водой и льдом. Из этих данных созданы электрические модели для воды и льда, что позволило смоделировать влияние климатических факторов среды на электрические характеристики МЛП. Оценено влияние толщины слоя воды на S-

параметры МЛП. Используя коаксиальную камеру с более высокой граничной частотой, могут быть созданы приближенные электрические модели воды и льда с различными примесями, например, для морской воды.

Таким образом, представлены модели и методика для учета воздействия температуры и влажности воздуха на электрические характеристики МЛП, что позволит оценить изменение параметров сигналов РЭА в широких диапазонах частот, температур, влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды. Используя измеренные *S*-параметры и метод векторной подгонки (вектор Фиттинг), могут быть получены схемотехнические параметры воды с учетом ее температуры, необходимые для вычисления электрических характеристик различных линий передачи при их проектировании для заданных климатических условий эксплуатации, что будет сделано в дальнейшем.

Список источников

1. Zhou Y., Lang R.H., Dinnat E.P., Le Vine David M. Seawater Debye Model Function at L-Band and its Impact on Salinity Retrieval from Aquarius Satellite Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021. Vol. 59. Iss. 10. PP. 8103–8116. DOI:10.1109/TGRS.2020.3045771

2. Onibonoje M.O. A distributed control wireless system for environmental humidity determination based on adaptive controller model // Scientific African. 2021. Vol. 13. PP. 1–8. DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00922

3. Conseil-Gudla H., Staliulionis Z., Jellesen M.S., Jabbari M., Hattel J.H., Ambat R. Humidity Buildup in Electronic Enclosures Exposed to Constant Conditions // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017. Vol. 7. Iss. 3. PP. 412–423. DOI:10.1109/TCPMT.2017.2655447

4. Ambat R., Conseil-Gudla H. Improving intrinsic corrosion reliability of printed circuit board assembly // Proceedings of the 18th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC, Singapore, 30 November – 03 December 2016). IEEE, 2016. PP. 540–544. DOI:10.1109/EPTC.2016.7861538

5. Суппа М., Кузнецова Т. Методика исследования и испытаний влагозащитных покрытий, паяльных паст и технологических процессов // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 7(75). С. 78–82. EDN:SZSYXB

6. Jacobsen J.B., Krog J.P., Rimestad L., Riis A., Holm A.H. Climatic challenges and product level solutions for electronics in demanding applications // IMAPS Nordic. 2012. Vol. 536. Iss. 6986. PP. 1–8.

7. Wang H., Liserre M., Blaabjerg F. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2013. Vol. 7. Iss. 2. PP. 17–26. DOI:10.1109/MIE.2013.2252958

8. Artemov V. The Dielectric Properties and Dynamic Structure of Water and Ice // The Electrodynamics of Water and Ice. Springer Series in Chemical Physics. Cham: Springer, 2021. Vol. 124. PP. 131–169. DOI:10.1007/978-3-030-72424-5_4

9. Zhao L., Ma K., Yang Z. Changes of Water Hydrogen Bond Network with Different Externalities // International Journal of Molecular Sciences. 2015. Vol. 16. Iss. 4. PP. 8454–8489. DOI:10.3390/ijms16048454

10. Kozak R., Khorsand K., Zarifi T., Golovin K., Zarifi M.H. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Iss. 1. PP. 1–11. DOI:10.1038/s41598-021-93082-2

11. Schoenlinner B., Steinmayer M., Schulte B. Cabin ceiling-integrated broadband antenna for wireless services in passenger aircraft // Proceedings of the 42nd European Microwave Conference (Amsterdam, Netherlands, 29 October – 01 November 2012). IEEE, 2012. PP. 846–849. DOI:10.23919/EuMC.2012.6459217

12. Ley S., Schilling S., Fiser O., Vrba J., Sachs J., Helbig M. Ultra-wideband Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy of Porcine Tissue and Blood in the Microwave Frequency Range // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 7. PP. 1–21. DOI:10.3390/s19071707

13. Gregory A.P., Quéléver K., Allal D., Jawad O. Validation of a Broadband Tissue-Equivalent Liquid for SAR Measurement and Monitoring of its Dielectric Properties for Use in a Sealed Phantom // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 10. PP. 1–13. DOI:10.3390/s20102956

14. Lun'kov A.E., Kovalev D.G. Dispersion of Water Conductivity in the Frequency Range of 10⁴–10⁶ Hz // Russian Journal of Electrochemistry. 2019. Vol. 55. PP. 1246–1250. DOI:10.1134/S1023193519120103

15. Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I., Zhuravlev A.V., Korovin E.Yu. Analysis of Dielectric Spectra of Water with Conductive Impurities in a Wide Frequency Range // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 60. PP. 1893–1900. DOI:10.1007/s11182-018-1299-4

16. Water Structure and Science. URL: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html (Accessed 21.01.2024)

17. Wilson P.F., Ma M.T., Adams J.W. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I. Far-field source simulation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1988. Vol. 30. Iss. 3. PP. 239–250. DOI:10.1109/15.3302

18. Wilson P.F., Ma M.T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. NBS technical note № 1095. Washington: U.S. Government Printing Office, 1986. 66 p.

19. Невежин В.Н., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Анализ электрических параметров жидкостей в коаксиальной камере при изменении температуры // Ural Radio Engineering Journal. 2023. Т. 7. № 1. С. 37–55. DOI:10.15826/ urej.2023.7.1.003. EDN:UJYZTS

20. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. PP. 1–6. DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012077

21. Database Summary // IT IS FOUNDATION. URL: https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/ database-summary (Accessed 21.01.2024)

22. Vidjak K., Hessinger C., Cavagnaro M. Broadband Dielectric Spectroscopy with a Microwave Ablation Antenna // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 5. PP. 1–21. DOI:10.3390/s23052579

References

1. Zhou Y., Lang R.H., Dinnat E.P., Le Vine David M. Seawater Debye Model Function at L-Band and its Impact on Salinity Retrieval from Aquarius Satellite Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021;59(10):8103-8116. DOI:10.1109/TGRS.2020.3045771

2. Onibonoje M.O. A distributed control wireless system for environmental humidity determination based on adaptive controller model. Scientific African. 2021;13:1–8. DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00922

3. Conseil-Gudla H., Staliulionis Z., Jellesen M.S., Jabbari M., Hattel J.H., Ambat R. Humidity Buildup in Electronic Enclosures Exposed to Constant Conditions. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017;7(3): 412-423. DOI:10.1109/TCPMT.2017.2655447

4. Ambat R., Conseil-Gudla H. Improving intrinsic corrosion reliability of printed circuit board assembly. Proceedings of the 18th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC, 30 November – 03 December 2016, Singapore. IEEE; 2016. p.540–544. DOI:10.1109/EPTC.2016.7861538

5. Suppa M., Kuznetsova M. Research and testing methods for moisture barrier coatings, solder pastes and processes. Technologies in the electronics industry. 2014;7(75):34-46. (in Russ.). EDN:SZSYXB

6. Jacobsen J.B., Krog J.P., Rimestad L., Riis A., Holm A.H. Climatic challenges and product level solutions for electronics in demanding applications. IMAPS Nordic. 2012;536(6986):1-8.

7. Wang H., Liserre M., Blaabjerg F. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2013;7(2):17-26. DOI:10.1109/MIE.2013.2252958

8. Artemov V. The Dielectric Properties and Dynamic Structure of Water and Ice. In: The Electrodynamics of Water and Ice. Springer Series in Chemical Physics, vol.124. Cham: Springer, 2021. p.131–169. DOI:10.1007/978-3-030-72424-5_4

9. Zhao L., Ma K., Yang Z. Changes of Water Hydrogen Bond Network with Different Externalities. International Journal of Molecular Sciences. 2015;16(4):8454-8489. DOI:10.3390/ijms16048454

10. Kozak R., Khorsand K., Zarifi T., Golovin K., Zarifi M.H. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection. Scientific Reports. 2021;11(1):1-11. DOI:10.1038/s41598-021-93082-2

11. Schoenlinner B., Steinmayer M., Schulte B. Cabin ceiling-integrated broadband antenna for wireless services in passenger aircraft. Proceedings of the 42nd European Microwave Conference, 29 October – 01 November 2012, Amsterdam, Netherlands). IEEE; 2012. p.846-849. DOI:10.23919/EuMC.2012.6459217

12. Ley S., Schilling S., Fiser O., Vrba J., Sachs J., Helbig M. Ultra-wideband Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy of Porcine Tissue and Blood in the Microwave Frequency Range. Sensors. 2019;19(7):1-21. DOI:10.3390/s19071707

13. Gregory A.P., Quéléver K., Allal D., Jawad O. Validation of a Broadband Tissue-Equivalent Liquid for SAR Measurement and Monitoring of its Dielectric Properties for Use in a Sealed Phantom. Sensors. 2020;20(10):1-13. DOI:10.3390/s20102956

14. Lun'kov A.E., Kovalev D.G. Dispersion of Water Conductivity in the Frequency Range of 104-106 Hz. Russian Journal of Electrochemistry 2019;55:1246-1250. DOI:10.1134/S1023193519120103

15. Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I., Zhuravlev A.V., Korovin E.Yu. Analysis of Dielectric Spectra of Water with Conductive Impurities in a Wide Frequency Range. Russian Physics Journal. 2018;60:1893-1900. DOI:10.1007/s11182-018-1299-4

16. Water Structure and Science. URL: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html [Accessed 21.01.2024] 17. Wilson P.F., Ma M.T., Adams J.W. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I.

Far-field source simulation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1988;30(3):239–250. DOI:10.1109/15.3302 18. Wilson P.F., Ma M.T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. NBS

- technical note № 1095. Washington: U.S. Government Printing Office; 1986. 66 p.
- 19. Nevezhin V.N., Busygina A.V., Komnatnov M.E. Analysis of electrical parameters of liquids in a coaxial cell at varying temperatures. Ural Radio Engineering Journal. 2023;7(1):37-55. (in Russ.). DOI:10.15826/urej.2023.7.1.003. EDN:UJYZTS
- 20. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;734(1):1–6. DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012077
- 21. IT IS FOUNDATION. Database Summary. URL: https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/ database-summary [Accessed 21.01.2024]

22. Vidjak K., Hessinger C., Cavagnaro M. Broadband Dielectric Spectroscopy with a Microwave Ablation Antenna. Sensors. 2023;23.(5):1-21. DOI:10.3390/s23052579

Статья поступила в редакцию 18.07.2024; одобрена после рецензирования 09.08.2024; принята к публикации 20.09.2024.

The article was submitted 18.07.2024; approved after reviewing 09.08.2024; accepted for publication 20.09.2024.

Информация об авторах:

НЕВЕЖИН Виталий Николаевич

аспирант кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники https://orcid.org/0000-0002-2257-7690

КОМНАТНОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники Максим Евгеньевич 6 https://orcid.org/0000-0002-6463-2889

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов. The authors declare no conflicts of interests.

33