

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОМЕЩЕНИИ ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЫ ВНУТРИ И ВНЕ ВОЛНОВОДА

© Авторы, 2013

Мериакри В. В. Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

E-mail: meriakri@ms.ire.rssi.ru

Пархоменко М. П. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

E-mail: m.parkhomenko@ms.ire.rssi.ru

Чепурных И. П. Научный сотрудник института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

E-mail: ichepurnyh@mail.ru

Плешанов С. С. Стажер-техник института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

E-mail: m.parkhomenko@ms.ire.rssi.ru

Аннотация

В ранее опубликованной статье авторов был предложен метод определения комплексной диэлектрической проницаемости слабых водных растворов глюкозы путем измерения резонансного значения минимума коэффициента отражения и соответствующей ему частоты от структуры: волновод – согласующая диэлектрическая пластина в волноводе – слой раствора. Расчет производился для конфигурации, когда жидкость находится внутри волновода и когда электродинамическая задача решается достаточно просто аналитически. Однако в ряде случаев исследуемую среду удобнее помещать на открытом конце волновода с согласующей пластинкой внутри него. В этом случае получалась уже не внутренняя электродинамическая задача, а внешняя, результаты решения которой должны отличаться от результатов внутренней задачи. В данной работе проводится численный анализ различия результатов для упомянутых двух конфигураций, показавший различие в определении диэлектрической проницаемости измеряемой среды.

Ключевые слова: оценка погрешности измерений, диэлектрические свойства, миллиметровые волны

Abstract

In our earlier paper, we proposed a method for determining the complex dielectric constant of weak water solutions of glucose by measuring the minimum reflection coefficient at resonance and the corresponding resonance frequency of the structure consisting of a waveguide, a matching dielectric plate in the waveguide, and a layer of a test solution. Calculations were carried out for a configuration when the test liquid is inside the waveguide and thereby the electrodynamic problem is rather easily solved analytically. However, in many cases it is more convenient to place a test liquid at the open end of the waveguide with a matching plate inside the latter. In this case, we deal with an external, rather than internal, electrodynamic problem, and the results of this problem should differ from the results of the internal problem. In this paper, we carry out a numerical analysis of the difference between the results obtained with the two above-mentioned configurations, which leads to a significant difference in the values of the dielectric constants of test materials.

Key words: measurement error estimates, dielectric properties, millimeter waves

Введение

Создание приборов для контроля состава слабых водных растворов методами диэлектрической спектроскопии является важной научной и практической задачей.

В работе [1] была описана методика определения малых отличий диэлектрических свойств слабого водного раствора (например, глюкозы) от свойств воды. В этом случае расчет комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon' - j\varepsilon''$ (где $j = \sqrt{-1}$) по точной аналитической модели [2] со средой внутри волновода допустим из-за малого отличия ε' и ε'' исследуемого раствора и воды. Однако во многих случаях надо определить абсолютные значения ε' и ε'' неизвестной сильно поглощающей среды без привязки к диэлектрическим свойствам воды и, кроме того, помещать её для удобства измерений в измерительной установке вне волновода.

Достоинством представленного в [1] метода измерения комплексной проницаемости сред с большими потерями (например, водных растворов) является то, что при измерениях требуется определять только минимум коэффициента отражения и соответствующую частоту этого минимума. Измерительная установка представляет собой прямоугольный волновод, возбуждаемый волной H_{10} , далее в волноводе поставлена согласующая плоскопараллельная пластина из слабо поглощающего диэлектрика с известными диэлектрическими свойствами, далее – слой исследуемой среды с большим поглощением (вода, раствор, кровь, кожа). Если исследуемая среда представляет собой плоскопараллельный слой в том же волноводе, то коэффициент отражения описанной структуры из трех слоев, можно определить из известного выражения [2], зная соответствующие коэффициенты преломления слоев. В [1] разработана компьютерная программа, с помощью которой по величинам минимума коэффициента отражения, соответствующей частоты минимума и подобранной толщины согласующего слоя с известным значением коэффициента преломления определяются значения комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon' - j\varepsilon''$ измеряемой среды. Это в принципе решило поставленную в работе проблему. Однако по ряду причин жидкость или другую сильно поглощающую среду удобнее помещать на открытом конце волновода с согласующей пластинкой внутри него (что и было сделано в ряде измерений [1]). В этом случае мы имеем уже не внутреннюю электродинамическую задачу, а внешнюю, результаты решения которой должны отличаться от результатов внутренней задачи. В данной работе проводится численный анализ различия результатов для упомянутых двух конфигураций: 1) исследуе-

мая среда находится в волноводе; 2) среда находится вне волновода на его фланце.

Сравнение результатов расчетов коэффициентов отражения $|S_{11}|$ для двух измерительных установок при исследовании дистиллированной воды.

Численное исследование с использованием трехмерного электродинамического программного пакета проводилось для двух измерительных установок, общий вид которых, приведен на рис. 1, 2. На рис. 1 представлена структура из трех слоев в прямоугольном волноводе: воздух, согласующий слой диэлектрика и исследуемая среда с большим поглощением, которую назовем "волноводной" измерительной установкой. На рис. 2 представлена структура из двух слоев в волноводе, а третий слой с исследуемой средой в виде капли помещен на фланец волновода - назовём такую измерительную установку "волноводной с фланцем". В обеих установках поперечные размеры прямоугольного металлического волновода составляли 7,2 x 3,4 мм, и использовался рабочий тип волны H_{10} .

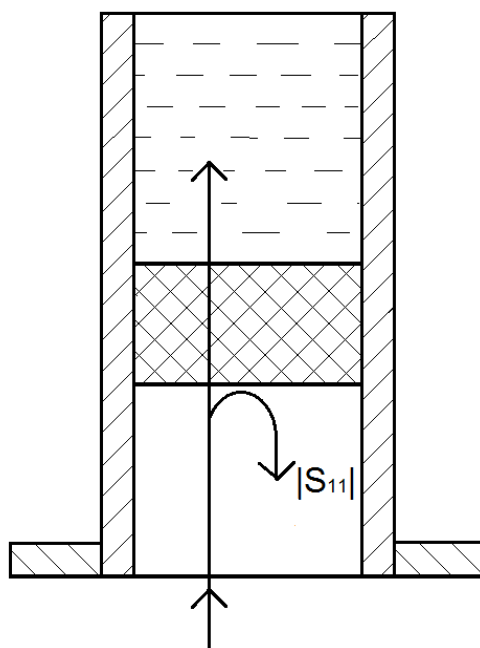


Рис. 1:Общий вид измерительной установки, называемой "волноводной".

Снизу находится волновод с воздушным заполнением, возбуждаемый волной H_{10} , в середине – согласующая плоскопараллельная пластина толщиной 3,8 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon' = 4,131$, с тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = 0,041$, выше расположен слой дистиллированной воды при фиксированной температуре.

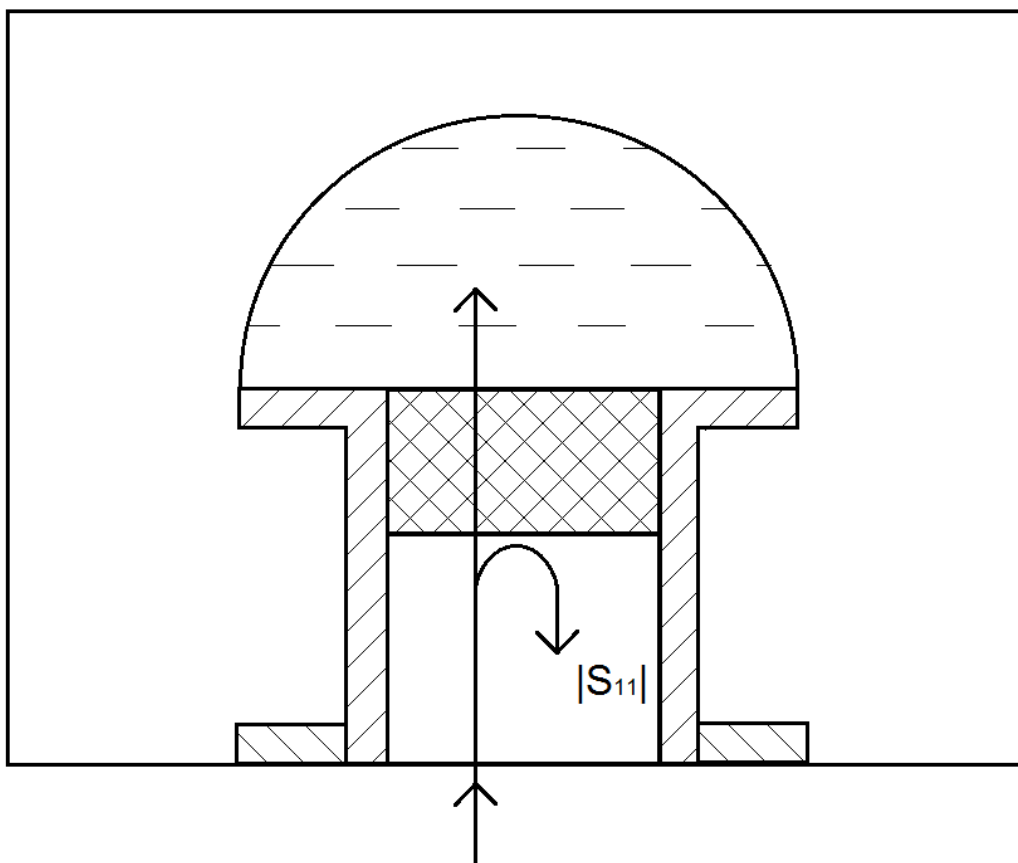


Рис. 2: Общий вид измерительной установки, называемой "волноводной с фланцем". Снизу находится волновод с воздушным заполнением, возбуждаемый волной H_{10} , далее – согласующая плоскопараллельная пластина толщиной 3,8 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon' = 4,131$, с тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = 0,041$, выше – дистиллированная вода в виде капли – полусфера с радиусом 7,5 мм, расположенная на фланце волновода. Внешняя воздушная среда изображена в виде параллелепипеда, на гранях которого реализуются условия излучения Зоммерфельда при расчетах с использованием трехмерного программного пакета.

Нами численно исследовались два варианта дистиллированной воды при температурах $t = 20^\circ$ и $t = 25^\circ$. Для этих температур диэлектрическая проницаемость воды на частоте $f = 30$ ГГц взята нами из работы [3] и равна при $t = 20^\circ$: $\epsilon' = 23,519$, $\epsilon'' = 31,837$, ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = 1,3537$); при $t = 25^\circ$: $\epsilon' = 26,736$, $\epsilon'' = 33,078$, ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = 1,2372$). Расчет с использованием трехмерного программного пакета коэффициента отражения $|S_{11}|$ для волноводной установки (рис. 1) при $t = 20^\circ$ приведен на рис. 3, при $t = 25^\circ$ - на рис. 4, а для волноводной установки с фланцем (рис. 2) при $t = 20^\circ$ приведен на рис. 5, при $t = 25^\circ$ - на рис. 6.

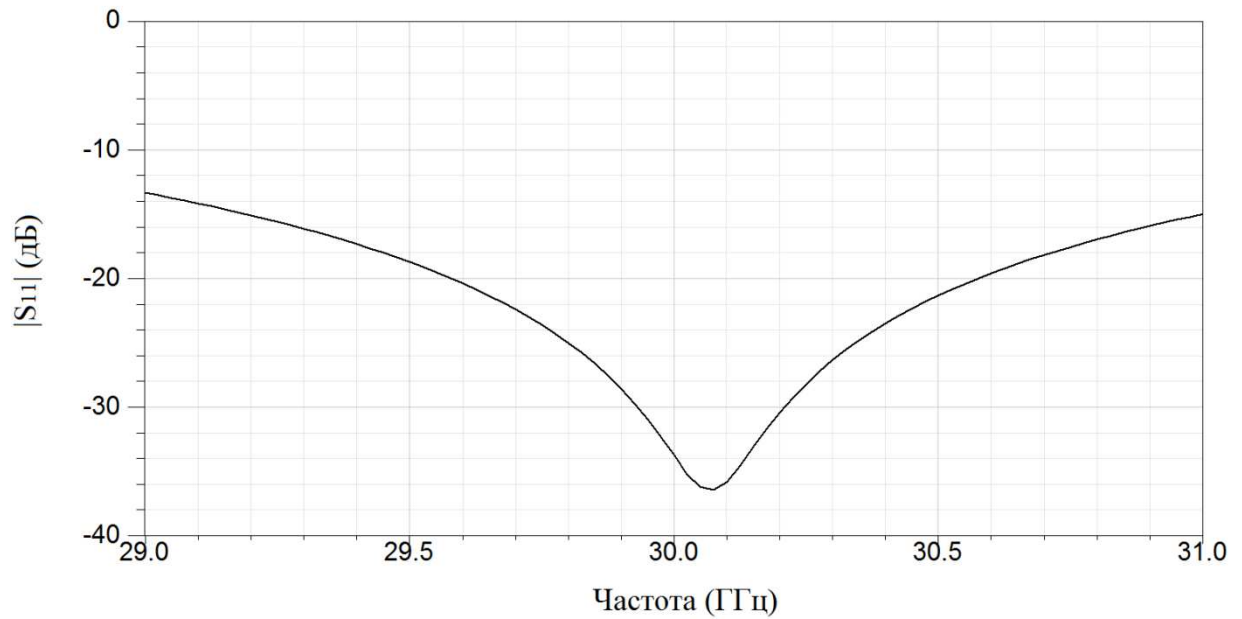


Рис. 3: Зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ в дБ от частоты, рассчитанная с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки рис. 1 для дистиллированной воды при $t = 20^\circ$, $\epsilon' = 23,519$, $\epsilon'' = 31,837$, ($\text{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon' = 1,3537$).

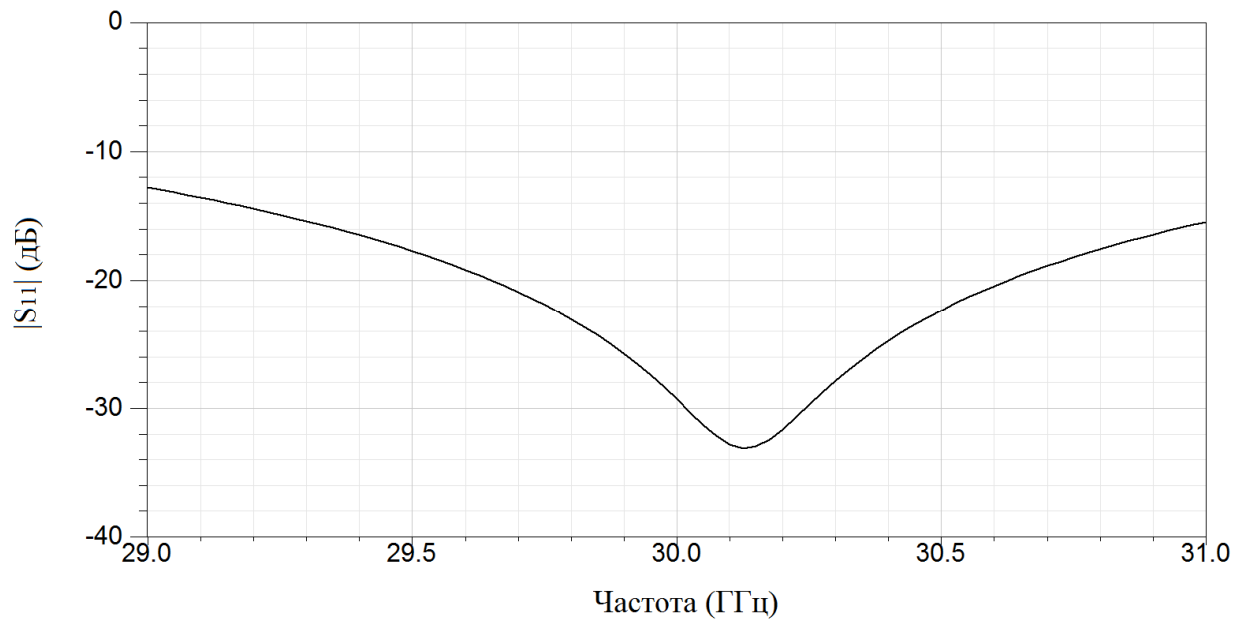


Рис. 4: Зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ в дБ от частоты, рассчитанная с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки рис. 1 для дистиллированной воды при $t = 25^\circ$, $\epsilon' = 26,736$, $\epsilon'' = 33,078$, ($\text{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon' = 1,2372$).

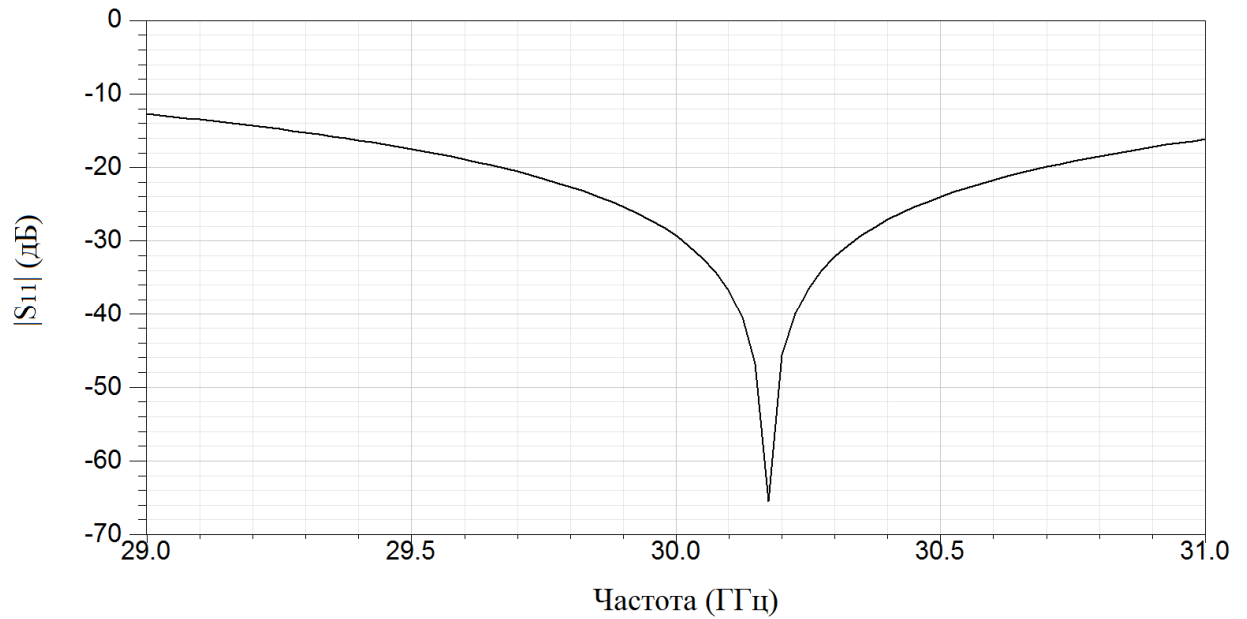


Рис. 5: Зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ в дБ от частоты, рассчитанная с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки с фланцем рис. 2 для дистиллированной воды при $t = 20^\circ$, $\epsilon' = 23,519$, $\epsilon'' = 31,837$, ($\text{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon' = 1,3537$).

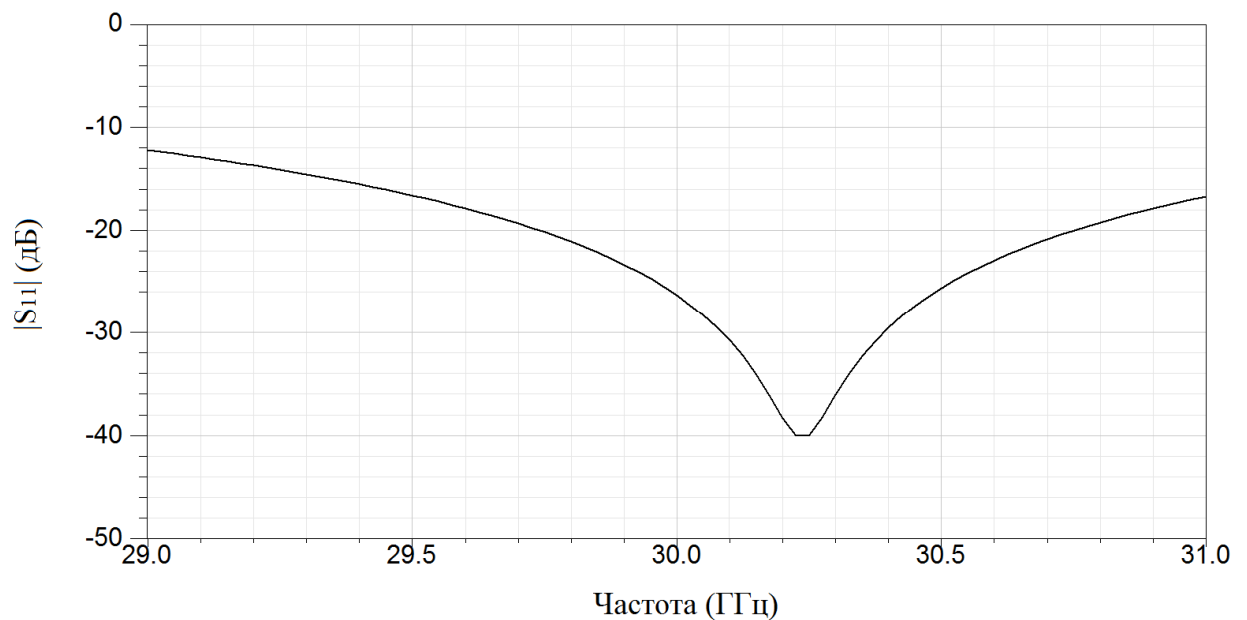


Рис. 6: Зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ в дБ от частоты, рассчитанная с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки с фланцем рис. 2 для дистиллированной воды при $t = 25^\circ$, $\epsilon' = 26,736$, $\epsilon'' = 33,078$, ($\text{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon' = 1,2372$).

Для сравнения поместим кривые рис. 3 и рис. 5 $|S_{11}|$ для разных установок рис. 1 и рис. 2 на рис.7 (при температуре воды $t = 20^\circ$), а кривые рис. 4 и рис. 6 – на рис. 8 (при температуре воды $t = 25^\circ$).

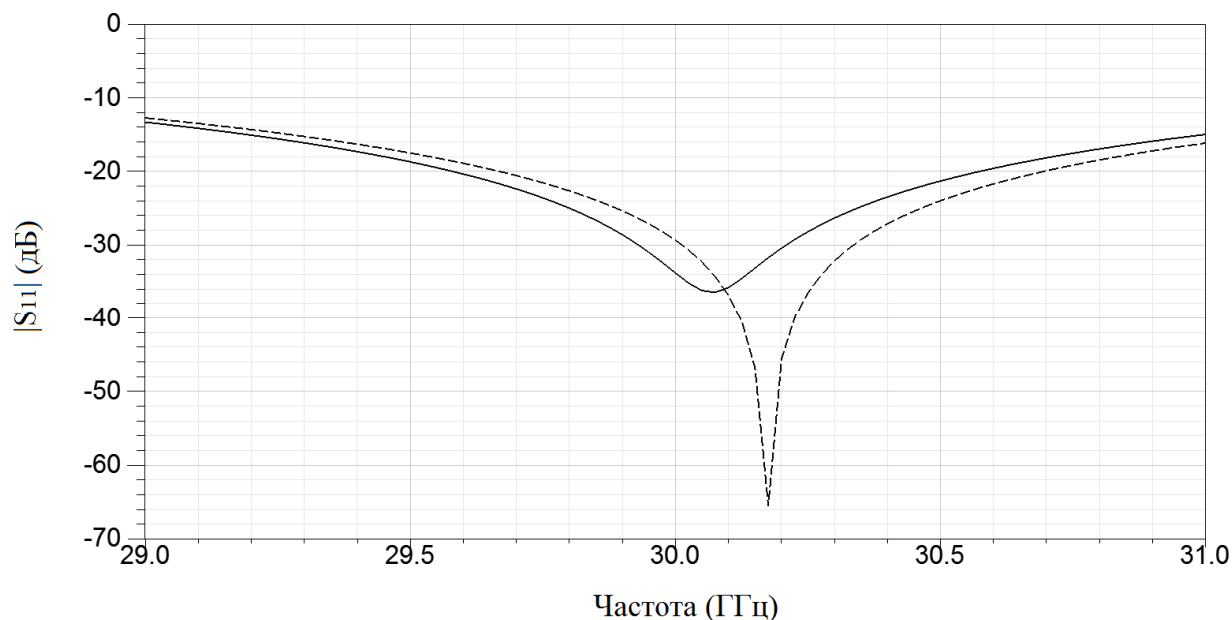


Рис. 7: Сравнение коэффициентов отражения $|S_{11}|$ в дБ в зависимости от частоты, рассчитанных с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки рис. 1 (кривая —) и для волноводной установки с фланцем рис. 2 (кривая - - -) для дистиллированной воды при $t = 20^\circ$, $\epsilon' = 23,519$, $\epsilon'' = 31,837$, ($\text{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon' = 1,3537$).

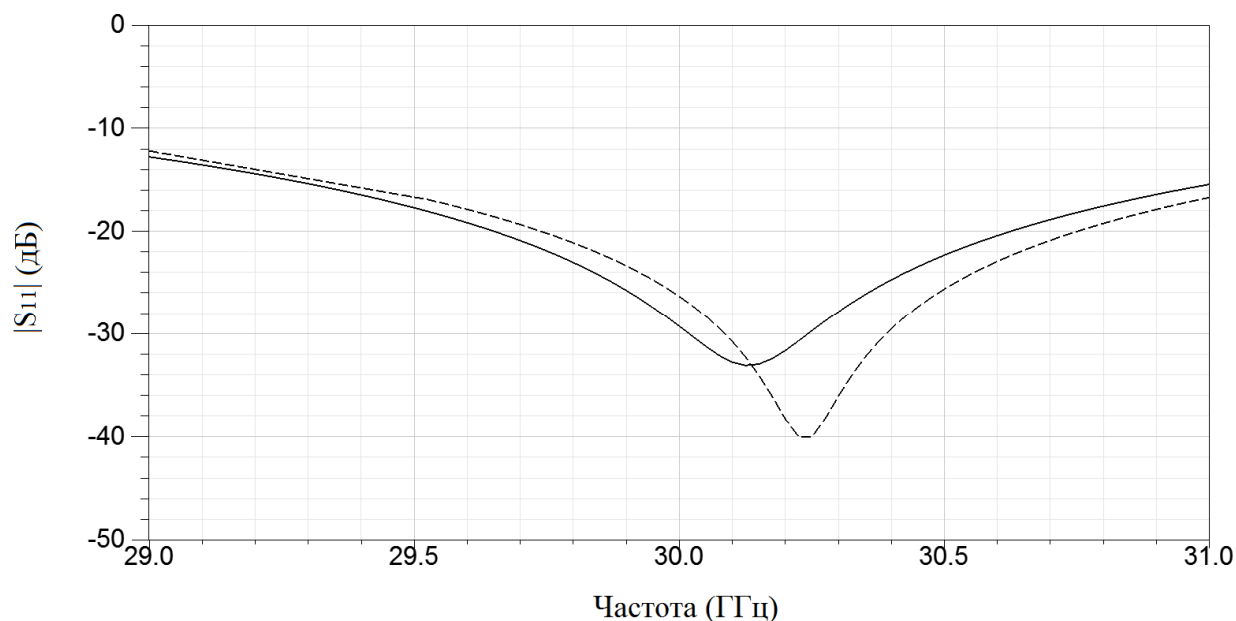


Рис. 8: Сравнение коэффициентов отражения $|S_{11}|$ в дБ в зависимости от частоты, рассчитанных с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки рис. 1 (кривая —) и для волноводной установки с фланцем рис. 2 (кривая - - -) для дистиллированной воды при $t = 25^\circ$, $\varepsilon' = 26,736$, $\varepsilon'' = 33,078$, ($\text{tg}\delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 1,2372$).

Значительное различие кривых $|S_{11}|$ на рис. 7 и рис. 8 показывает, что установки рис. 1 и рис. 2 функционально не эквивалентны, т.е. если обрабатывать экспериментальные характеристики, полученные на волноводной установке с фланцем рис. 2 с помощью расчетной модели для волноводной установки рис. 1 (что и сделано в ряде случаев в работе [1]), то будут получены неверные результаты, при определении диэлектрической проницаемости исследуемой среды (в нашем случае дистиллированной воды). В какой степени эти результаты могут быть различными, попытаемся установить ниже, проводя численную оценку этих отличий.

Численная оценка погрешностей результатов измерения характеристик водных растворов.

Для получения численной оценки погрешностей результатов измерения комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon' - j\varepsilon''$ исследуемой среды (дистиллированной воды), получаемых в работе [1], будем придерживаться следующей логической схемы. Очевидно, что если бы в работе [1] при измерениях применялась волноводная установка рис. 1, то последующее компьютерное вычисление комплексной проницаемости исследуемой среды (см. Введение) давало бы правильный (без погрешности) результат. Однако из-за

замены в [1] корректно численно смоделированной измерительной волноводной установки (рис.1) на измерительную волноводную установку с фланцем (рис.2) возникает погрешность измерения комплексной проницаемости. Мы получим правильную оценку этой погрешности, если например, для дистиллированной воды при температуре $t = 20^\circ$, $\varepsilon' = 23,519$, $\varepsilon'' = 31,837$, ($\text{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 1,3537$): 1) Рассчитаем с использованием трехмерного электродинамического программного пакета зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ от частоты для волноводной установки с фланцем (рис. 2). Результаты такого расчета приведены выше, см.рис. 5; 2) Затем для волноводной установки (рис. 1) проведем ряд расчетов этой же зависимости, подбирая комплексную проницаемость $\varepsilon' - j\varepsilon''$ так, чтобы величина минимума $|S_{11}|$ и частота, соответствующая этому минимуму, совпали с приведенными на рис.5. Успешный результат такого подбора комплексной проницаемости при $\varepsilon' = 27,54$, $\varepsilon'' = 27,953$, $\text{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 1,015$, для которого график рассчитанной зависимости коэффициента отражения $|S_{11}|$ совпадает с графиком рис. 5, приведен на рис. 9. Таким образом, при измерении комплексной проницаемости $\varepsilon' - j\varepsilon''$ дистиллированной воды при температуре $t = 20^\circ$ по методике изложенной в работе [1], где корректная измерительная волноводная установка (рис.1) подменена волноводной установкой с фланцем (рис.2), вместо реальных значений $\varepsilon' = 23,519$, $\varepsilon'' = 31,837$, ($\text{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 1,3537$) получены искаженные значения $\varepsilon' = 27,54$ (с различием $\Delta\varepsilon' \approx +17,1\%$), $\varepsilon'' = 27,953$ (с различием $\Delta\varepsilon'' \approx -12,0\%$), ($\text{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 1,015$).

Для дистиллированной воды при температуре $t = 25^\circ$ нами проведено аналогичное численное исследование (см. рис. 10) и также вместо реальных значений $\varepsilon' = 26,736$, $\varepsilon'' = 33,078$, ($\text{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 1,2372$) получены значительно искаженные значения $\varepsilon' = 28,572$ (с различием $\Delta\varepsilon' \approx + 6,87\%$), $\varepsilon'' = 24,686$ (с различием $\Delta\varepsilon'' \approx - 25,37\%$), ($\text{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = 0,864$).

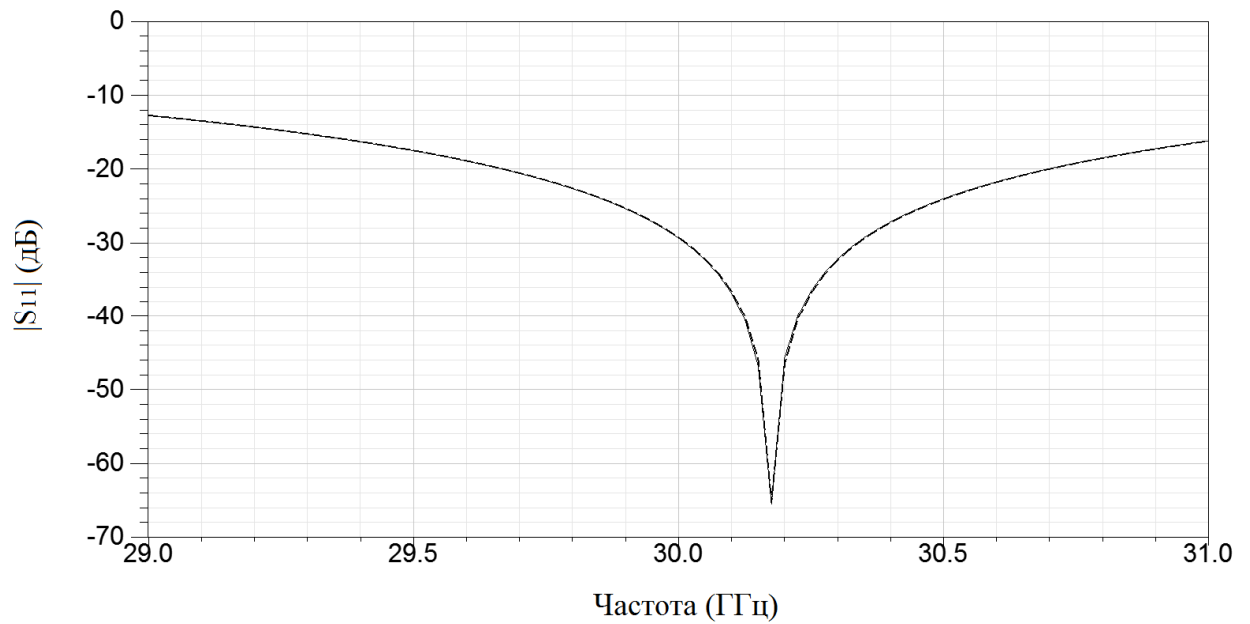


Рис. 9: Сравнение коэффициентов отражения $|S_{11}|$ в дБ в зависимости от частоты, рассчитанных с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки с фланцем рис. 2 (кривая —) для дистиллированной воды при $t = 20^\circ$, $\epsilon' = 23,519$, $\epsilon'' = 31,837$, $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = 1,3537$ (см. также рис. 5) и для волноводной установки рис. 1 (кривая - - -), где для исследуемой воды расчетами подобраны $\epsilon' = 27,54$, $\epsilon'' = 27,953$, ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = 1,015$) так, что обе кривые графически совпадают.

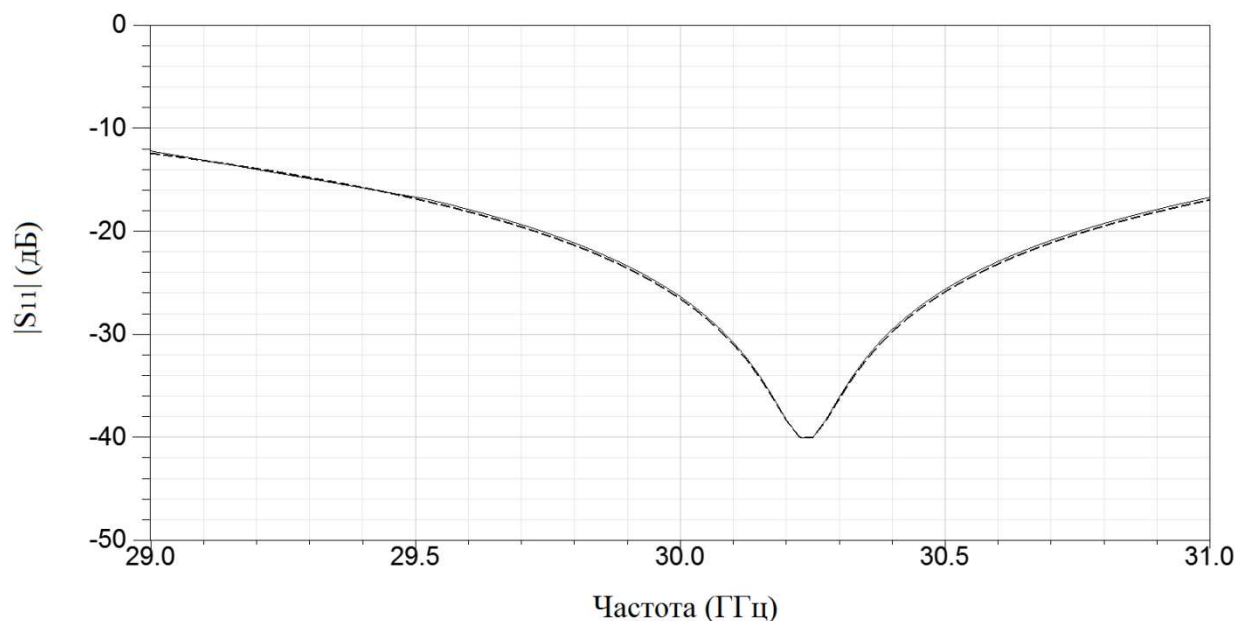


Рис. 10: Сравнение коэффициентов отражения $|S_{11}|$ в дБ в зависимости от частоты, рассчитанных с использованием трехмерного программного пакета, для волноводной установки с фланцем рис. 2 (кривая —) для дистиллированной воды при $t = 25^\circ$, $\epsilon' = 26,736$, $\epsilon'' = 33,078$, ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = 1,2372$) (см. также рис. б) и для волноводной установки рис. 1 (кривая - - -), где для исследуемой воды расчетами подобраны $\epsilon' = 28,572$, $\epsilon'' = 24,686$, ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' = 0,864$) так, что обе кривые графически совпадают.

Заключение

В работе [1] представлен метод и результаты измерения комплексной проницаемости сред с большими потерями (водных растворов). Но в этой работе в ряде случаев измерения проводились на измерительной установке, отличной от той, модель которой заложена в компьютерную обработку измерений. В настоящей работе показано, что такая подмена измерительной установки неправомерна, поскольку может привести к искажению определения комплексной проницаемости среды с различием порядка 10 процентов и более.

Отметим также ключевую роль вычислительного приема с использованием трехмерного программного пакета, когда несложным подбором по заданной электродинамической характеристике (здесь по коэффициенту отражения) определялись значения комплексной диэлектрической проницаемости неизвестной среды. Это в итоге позволило получить численную оценку раз-

личий определения комплексной проницаемости. Укажем, что подобный вычислительный прием решает своего рода обратную задачу электродинамики и может быть использован в различных применениях для обработки экспериментальных электродинамических характеристик с целью получения характеристик неизвестных материалов и сред.

Отметим также, что основным результатом данного исследования является то, что в случае помещения измеряемой сильно поглощающей среды на фланце волновода для строгого расчета значений комплексной диэлектрической проницаемости этой среды надо использовать адекватную, а не упрощенную модель компьютерной программы.

Список литературы

1. Мериакри В. В, Чигряй Е. Е, Никитин И. П, Пархоменко М. П, Пангонис Л.И, Ким Д. К, Вон Ж. Х. Диэлектрические свойства растворов глюкозы в миллиметровом диапазоне волн и проблема контроля её содержания в крови. // Электромагнитные волны & электронные системы, 2005, Т.10, №4, С. 31-38.
2. Борн. М., Вольф Э. Основа оптики. – М.: Наука, 1970, 855 С.
3. Thomas Meissner and Frank J. Wentz The Complex Dielectric Constant of Pure and Sea Water from Microwave Satellite Observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. September 2004. Vol. 42. №9, P .1836-1849.

Study of the Difference between the Measurements of High-Loss Dielectric Materials When the Test Medium is Placed Inside or Outside the Waveguide

Meriakri V.V., Parkhomenko M.P., Chepurnykh I.P., Pleshanov S.S.

In our earlier paper, we proposed a method for determining the complex dielectric constant of weak water solutions of glucose by measuring the minimum reflection coefficient at resonance and the corresponding resonance frequency of the structure consisting of a waveguide, a matching dielectric plate in the waveguide, and a layer of a test solution. Calculations were carried out for a configuration when the test liquid is inside the waveguide and thereby the electrodynamic problem is rather easily solved analytically. However, in many cases it is more convenient to place a test liquid at the open end of the waveguide with a matching plate inside the latter. In this case, we deal with an external, rather than internal, electrodynamic problem, and the results of this problem should differ from the results of the internal problem. In this paper, we carry out a numerical analysis of the difference between the results obtained with the two above-mentioned configurations, which leads to a significant difference in the values of the dielectric constants of test materials.

Meriakri V.V., Dr. Sci. (Phys.--Math.), Chief Researcher, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences.

Parkhomenko M.P., Cand. Sci. (Phys.--Math.), Senior Researcher, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences.

Chepurnykh I.P., Researcher, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences.

Pleshanov S.S., Trainee Engineer, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences.