

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ

Д.Овсов¹

УДК 621.317.1
БАК 05.11.00

Для защиты антенных систем от воздействия внешней среды применяют диэлектрические покрытия – обтекатели. При заданной форме и прочностных характеристиках необходимо выбрать для обтекателя такой материал, который вносил бы затухания и искажения излучаемых антенной электромагнитных волн в допустимых пределах. С помощью программно-аппаратного комплекса измерения диэлектрических свойств материала, построенного на базе векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz, можно определить коэффициенты прохождения и отражения защитных покрытий антенн. Данная система позволяет проводить измерения свойств материалов в широком диапазоне частот и рабочих температур.

Электромагнитная энергия, излучаемая или принимаемая антенной, частично проходит через диэлектрик, а частично поглощается и отражается им. При выборе материала обтекателя следует стремиться к достижению максимального коэффициента прохождения и к минимальным искажениям фазового фронта прошедшей волны.

При расположении покрытия в дальней зоне поля излучения антенны защита представляет собой плоский слой полупроводящего материала. В этом случае для расчета коэффициентов прохождения и отражения

электромагнитной волны в диэлектрическом покрытии используют следующие формулы [1]:

$$|T|^2 = \frac{\left[(1-|r|^2)^2 + 4r^2 \left(\sin \frac{\gamma d}{\cos \theta} \right)^2 \right] e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}{\left[1-|r|^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}} \right]^2 + 4|r|^2 \left(\sin \frac{\gamma d}{\cos \theta} \right)^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}, \quad (1)$$

$$|R|^2 = \frac{|r|^2 \left[\left(1 - e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}} \right)^2 \right] + 4 \left(\sin \frac{\gamma d}{\cos \theta} \right)^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}{\left(1-|r|^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}} \right)^2 + 4|r|^2 \left(\sin \frac{\gamma d}{\cos \theta} \right)^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}, \quad (2)$$

¹ Инженер ООО "Авангард", ovsov_denis@mail.ru.



Рис.1. Программно-аппаратный комплекс SPEAG DAK с анализатором цепей R&S ZNB20

где коэффициент отражения Френеля соответственно для параллельной и перпендикулярной поляризации:

$$r_{\parallel} = \frac{\epsilon \cos\theta - \sqrt{\epsilon - (\sin\theta)^2}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - (\sin\theta)^2}}, \quad (3)$$

$$r_{\perp} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon - (\sin\theta)^2}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - (\sin\theta)^2}}, \quad (4)$$

θ – угол, под которым падает электромагнитная волна на диэлектрическое покрытие; $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon}$ – коэффициент фазы; $\alpha = \frac{\pi \operatorname{tg}\delta \sqrt{\epsilon}}{\lambda}$ – коэффициент затухания; λ – длина

волны в свободном пространстве; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала покрытия толщиной d ; $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс диэлектрических потерь этого материала.

Выражения (1) и (2) являются основополагающими для аналитических оценок радиопрозрачности плоской диэлектрической защиты антенны, находящейся в дальней зоне поля излучения. Из этих выражений видно, что ключевым фактором, влияющим на характеристики покрытия, являются относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ материала, одному



Рис.4. Измерение свойств композитного материала с помощью комплекса DAK



Рис.2. Калибровка комплекса DAK на холостой ход



Рис.3. Калибровка комплекса DAK на короткое замыкание

из методов измерения которых посвящено данное исследование.

В зависимости от условий эксплуатации антенн применяют различные СВЧ диэлектрические покрытия. Широкое распространение в настоящее время получили стеклопластики, которые по своим физико-механическим свойствам превосходят другие пластмассы, такие как метакрилат, полистирол, полиэтилен. Наполнителем стеклопластика является неорганическое вещество. Связующее вещество имеет пористую структуру и характеризуется неоднородными свойствами. При работе его в условиях морской воды и дождей со временем происходит заполнение пор влагой, что ведет к изменениям свойств материала.

Стеклопластики обладают приемлемыми значениями ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ в сантиметровом диапазоне волн. В качестве связующих в них используется фенолформальдегидная, эпоксидно-кремнийорганическая и эпоксидно-фенольная смолы, сополимеры дивинила со стиролом и т.д. Наполнителями являются различные типы стеклотканей. Диэлектрическая

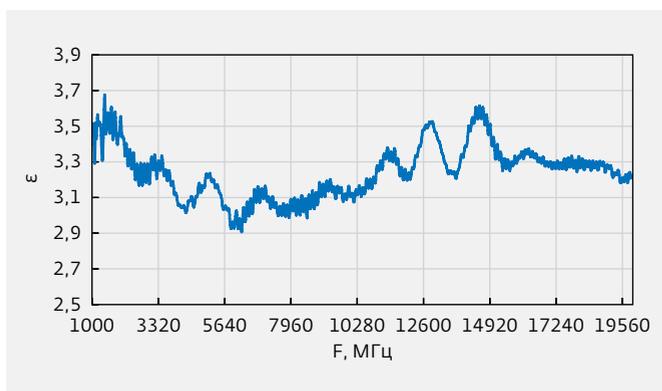


Рис.5. Результаты измерения диэлектрической проницаемости материала

проницаемость таких стеклопластиков лежит в пределах от трех до восьми. С увеличением объемного содержания стекла значение ϵ покрытия растет, а $\text{tg}\delta$ незначительно падает. В качестве образца исследуемого материала в нашем случае выбран один из видов стеклопластика – лист размером $500 \times 500 \times 10$ мм.

Для неразрушающего измерения диэлектрических параметров материалов применяют программно-аппаратный комплекс DAK (Dielectric Assessment Kit), разработанный швейцарской компанией SPEAG. Измерительный комплекс DAK состоит из коаксиального пробника, векторного анализатора цепей и специализированного ПО (рис.1).

Комплекс DAK является оптимальным решением для измерения диэлектрических параметров жидкостей и гелей. Геометрическая форма пробников

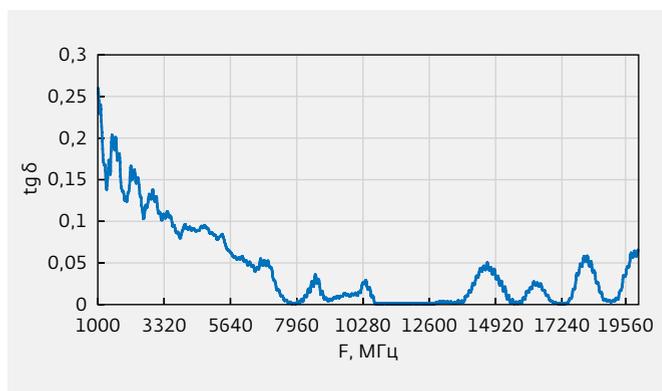


Рис.6. Результаты измерения тангенса диэлектрических потерь материала

позволяет минимизировать искажения электромагнитного поля в области измерения. В случае измерения твердых материалов образец должен иметь достаточно ровную поверхность (зазор между образцом и пробником должен быть не более 50 мкм), а также обладать достаточной толщиной, чтобы основная энергия электромагнитного поля распространялась в материале, а не в воздушной прослойке между пробником и образцом и в воздухе за образцом.

Преимуществами комплекса DAK являются высокая скорость измерений, портативная конструкция, широкий диапазон частот (от 200 МГц до 20 ГГц в используемой конфигурации), а также простота калибровки и работы с ПО. Для измерений используется один порт векторного анализатора цепей. Калибровка проводится на конце пробника, на его поверхности.

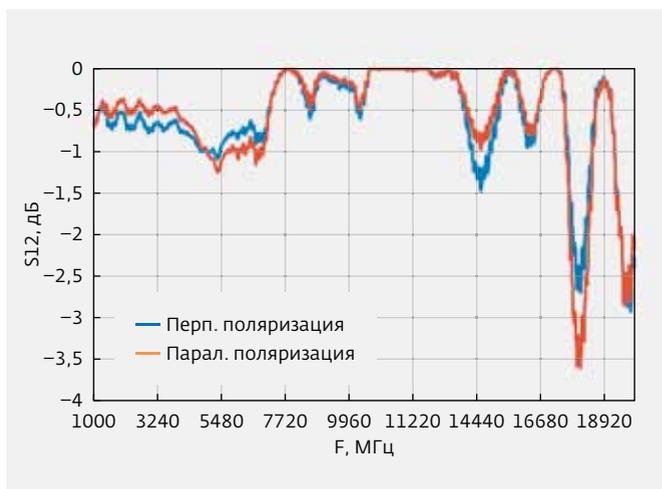


Рис.7. Коэффициент прохождения электромагнитной волны через исследуемый образец диэлектрика для параллельной и перпендикулярной поляризации

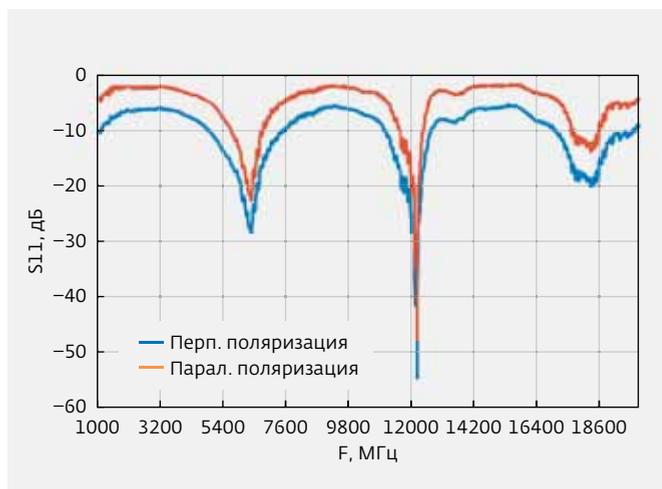


Рис.8. Коэффициент отражения электромагнитной волны от исследуемого образца диэлектрика для параллельной и перпендикулярной поляризации

В процессе калибровки выполняются следующие шаги:

- калибровка на холостой ход, которая выполняется на открытом конце пробника в воздухе (рис.2);
- калибровка на короткое замыкание: блок короткого замыкания с медной фольгой, монтируемый на поверхности пробника, работает как стандарт короткого замыкания, обеспечивая необходимое давление (рис.3);
- калибровка на нагрузку проводится погружением пробника в жидкость с известными диэлектрическими характеристиками, например, воду.

При измерении свойств диэлектрического материала необходимо обеспечить устойчивый контакт пробника с образцом (рис.4). Пробники, используемые в комплексе ДАК, легко сочетаются в работе с целым рядом векторных анализаторов цепей Rohde & Schwarz, в частности моделями серии ZNB. С помощью ПО, поставляемого с комплексом ДАК, можно управлять векторным анализатором цепей. Результат измерений отображается в различных форматах, включая диаграмму Смита, таблицу и диаграмму Коула-Коула.

На основе результатов измерения диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь материала, были рассчитаны коэффициенты отражения (S_{11})

и прохождения (S_{12}) электромагнитной волны для исследуемого образца диэлектрика для параллельной и перпендикулярной поляризации (рис.5–8).

Для обеспечения максимального прохождения волны через обтекатель электрическая толщина его должна быть равной или кратной половине длины волны в диэлектрике, из которого изготавливается данный обтекатель. Из полученных результатов следует, что минимальное отражение электромагнитной волны для исследуемого диэлектрика соответствует частотам 6290 и 12220 МГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бестугин А.Р., Горбацкий В.В., Красюк В.Н.** Аналитические и экспериментальные исследования влияния диэлектрических покрытий на излучение апертурных антенн // Информационно-управляющие системы. 2007. №6. С. 34–40.
2. **Завьялов А.С., Дунаевский Г.Е.** Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. – Томск: ТГУ, 1986. С. 24–31, 141–148.
3. **Ворошин М.Я., Карманов И.Н., Кошелев А.В. и др.** Физика нагрева СВЧ-диэлектриков летательных аппаратов и их защита. Монография. – Новосибирск, 2008.
4. https://www.rohde-schwarz.ru/products/test_and_measurement/Measurement_properties_materials