

Подавление эффекта Гиббса при цифровой обработке сигналов с целью повышения точности измерений электродинамических параметров образцов

Басков К.М. * ¹, Семенов В.Н. ¹, Фурманова Т.А. ¹, Чистяев В.А. ¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук*

Статья поступила в редакцию 01.09.2022

Одобрена после рецензирования 19.10.2022

Принята к публикации 31.10.2022

Аннотация

В статье представлен способ подавления эффекта Гиббса, который наблюдается при цифровой обработке результатов измерений S-параметров различных образцов материалов методом TimeDomain и приводит к существенным погрешностям измерений. Способ основан на введении в обрабатываемый сигнал функции предсказания. В результате во временной области обрабатываемый сигнал существенно укорачивается, что существенно уменьшает погрешности измерений, связанные с эффектом Гиббса при оконном преобразовании Фурье функций с разрывом. Представлены два варианта функции предсказания: линейная функция предсказания и функция предсказания в виде скользящего среднего. Эффективность применения линейной функции предсказания продемонстрирована как численно, так и экспериментально. Показано, что, в случае если в истинном сигнале существует узкополосный резонанс, то его временной спектр оказывается очень длинным. Это приводит к усилению эффекта Гиббса при цифровой обработке такого сигнала, а линейная функция предсказания не позволяет в полной мере его подавить. С помощью математического моделирования показано, что функция предсказания в виде скользящего среднего позволяет существенно повысить точность восстановления истинного сигнала, в котором наблюдается узкополосный резонанс.

Ключевые слова: TimeDomain, эффект Гиббса, коэффициент пропускания, коэффициент отражения, S-параметры, преобразование Фурье

Введение

Развитие радиотехнической измерительной техники с целью повышения точности результатов измерений имеет два направления. Во-первых, необходимо повышать точностные характеристики аппаратуры, которая применяется при проведении измерений радиотехнических характеристик объектов [1]. Во-вторых, необходимо совершенствовать алгоритмы цифровой обработки сигналов [2]. С появлением векторных анализаторов цепей (ВАЦ) появилась возможность проводить калибровку с вычитанием фона при проведении радиоизмерений, т.е. осуществлять вычитание сигналов, которые связаны с отражениями электромагнитной волны от посторонних предметов, не относящихся к исследуемому объекту. При этом чаще всего вычитания фона для достижения высокой точности измерений оказывается недостаточным, поэтому при проведении измерений электродинамических параметров объектов для повышения точности используют процедуру селекции сигналов во временной области TimeDomain.

В реальном эксперименте измеряется частотная зависимость S-параметров, в которую вносят вклад как основной сигнал, так и аддитивные помехи. Часто основной сигнал и аддитивные помехи разделены по времени. Поэтому применяют процедуру цифровой фильтрации измеренного сигнала. Для этого путём обратного преобразования Фурье измеренную частотную зависимость переводят во временную область, где появляется возможность отделить полезный сигнал от аддитивных помех с помощью оконной функции. После этого проводят процедуру прямого преобразования Фурье и переводят сигнал обратно в частотную область. В результате получают частотную зависимость S-параметра, не содержащую вклада аддитивных помех.

* Автор, ответственный за переписку: Константин Михайлович Басков, kokofech@rambler.ru

Известно, что использование такого вида цифровой обработки, связанной с обратным преобразованием Фурье измеренного сигнала, приводит к появлению паразитных осцилляций сигнала на краях частотного диапазона, так называемого эффекта Гиббса [3]. Эффект Гиббса связан со сходимостью ряда Фурье в точке разрыва функции. Поскольку в точке разрыва ряд Фурье сходится к функции очень медленно и неравномерно, предельная флуктуация частичной суммы ряда больше, чем скачок функции в этой точке. Эффект Гиббса всегда имеет место при резких нарушениях монотонности функций. На скачках он максимален, во всех остальных случаях амплитуда пульсаций зависит от характера нарушения монотонности функций. Быстрое преобразование Фурье, используемое в цифровой фильтрации, требует, чтобы количество точек равнялось 2^N . Обычно в процессе измерений снимается 2000 точек по частоте, которые добавляются нулями до 2^{14} . Добавление нулями массива с измеренными значениями позволяет получить интерполированное преобразование более сглаженной формы. Очевидно, что при добавлении нулями массива измеренных значений возникают разрывы, и даже использование весовых окон не позволяет полностью устранить эффект Гиббса. Осцилляции сигнала в низкочастотной части частотного диапазона могут сильно уменьшить динамический диапазон измерений.

В [4] описан стенд, который предназначен для измерения электродинамических параметров плоских образцов материалов в свободном пространстве в широкой полосе частот СВЧ диапазона. Для устранения влияния переотражений между измеряемым образцом и приемо-передающими рупорными антеннами в программно-аппаратном обеспечении измерительного стенда реализована процедура обработки измеренного сигнала в пространственной (временной) области TimeDomain. Также в [5] указано, что в цифровой обработке сигналов используется математический алгоритм подавления эффекта Гиббса, который наблюдается в виде осцилляций на краях частотного диапазона в измеренных и отфильтрованных во временной области частотных зависимостях S-параметров исследуемых образцов.

В настоящей работе описан способ, основанный на представленном в [6] математическом алгоритме, в котором подавление эффекта Гиббса осуществляется с помощью добавления функции предсказания в обрабатываемый сигнал в частотной области. Приводятся результаты численного моделирования, в котором эффект Гиббса подавляется с применением двух типов функции предсказания. Представлены результаты измерений коэффициента пропускания образца, изготовленного из кварцевого стекла, а также частотных зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемостей образца из композитного материала. Эти результаты демонстрируют повышение точности измерений при цифровой обработке сигнала с использованием разработанного способа подавления эффекта Гиббса.

1. Математический алгоритм подавления эффекта Гиббса при цифровой обработке измеренных частотных зависимостей S-параметров образцов материалов

В работе [4] был представлен стенд для измерения S-параметров образцов материалов, а также их диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот от 2 до 39 ГГц. На этом стенде перед проведением измерений проводится его калибровка, а именно измеряются сигнал фона и сигнал, с которым сравнивается измеряемый сигнал S-параметра образца. При проведении измерений исследуемый образец помещается в круглое окно металлической диафрагмы с нанесенным на нее радиопоглощающим покрытием, расположенной в ближней зоне рупорных антенн П6-23М при измерении в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц или П6-64 при измерении в диапазоне частот от 22 до 39 ГГц.

Для устранения мешающих переотражений в СВЧ тракте перед проведением измерений S-параметров на стенде в диапазоне частот $f_{beg} \dots f_{end}$ производится процедура калибровки, которая заключается в измерении матриц двух комплексных сигналов: сигнала фона S_{bgr} и калибровочного сигнала S_{resp} . После записи этих сигналов производится измерение матрицы комплексного сигнала S_{meas} , представляющего собой матрицу некалиброванных значений S-параметра образца. Таким образом комплексные значения матрицы S-параметра образца до процедуры цифровой фильтрации TimeDomain определяются следующим образом:

$$S_0 = \frac{S_{mes} - S_{bgr}}{S_{resp} - S_{bgr}}. \quad (1)$$

Однако вычитание сигнала фона S_{bgr} из измеренного S_{meas} и калибровочного S_{resp} сигналов не позволяет полностью избавиться от наличия аддитивных помех в сигнале S_0 . Поэтому необходимо провести цифровую обработку сигнала S_0 , т.е. выполнить пространственную (временную) фильтрацию TimeDomain полезного сигнала S от аддитивных помех, присутствующих в сигнале S_0 . Математическое выражение цифровой обработки сигнала TimeDomain можно записать следующей формулой:

$$S = F(w(t) F^{-1}(S_0)), \quad (2)$$

где F и F^{-1} – процедуры прямого и обратного преобразования Фурье; $w(t)$ – оконная функция, используемая для пространственной фильтрации полезного сигнала.

Существует множество разновидностей оконных функций, применяемых при цифровой фильтрации сигналов: прямоугольное окно, синус-окно, окно Ханна, окно Хемминга, окно Блэкмена и т.д. Далее рассмотрим процедуру цифровой фильтрации TimeDomain с использованием оконной функции, полученной свёрткой оконной функции Кайзера и прямоугольной оконной функции.

Сигнал S_0 представляет собой массив с размерностью $N(S_{0i}, i = 1 \dots N)$. Для ускорения расчетов, чтобы отображать обработанный сигнал в реальном масштабе времени, при цифровой обработке прямое и обратное преобразование Фурье сигнала лучше проводить с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье. Для этого массив измеренной величины S_{0i} необходимо записать в середину массива S_{F0j} с большей размерностью M , при этом число M должно быть произведением целых степеней простых чисел 2, 3, 5 и т.д. Элементы массива S_{F0j} , не занятые элементами массива S_{0i} , приравниваются нулю. В результате проведения процедуры обратного преобразования Фурье в соответствии с (2), измеренный сигнал во временной области обладает большой длительностью из-за разрывов, возникающих в частотном спектре массива S_{F0j} на границах диапазона частот измерений. Данное обстоятельство при использовании достаточно узкой оконной функции для проведения фильтрации полезного сигнала от близко расположенных помех приводит к образованию существенных погрешностей на границах измеряемого диапазона частот.

Для того, чтобы измеренный сигнал во временной области обладал меньшей длительностью, необходимо в измеренный сигнал в частотной области S_{0i} ввести предскажение таким образом, чтобы в процедуре обратного преобразования Фурье участвовал массив с элементами, равными нулю на границах измеряемого диапазона частот. Один из вариантов такого предсказания можно выразить следующим образом:

$$S'_{0i} = S_{0i} - T_i, \quad (3)$$

где $T_i = S_1 + (S_N - S_1) \frac{(i-1)}{N}$; S_1 и S_N – первый и последний элементы массива, содержащего результаты измерений после цифровой обработки сигнала TimeDomain.

В выражении (3) элементы массива T_i линейно изменяются в зависимости от индекса i от первого значения массива измеренных значений S_0 до последнего.

После процедуры пространственной фильтрации массива с предскажением S'_{0i} детерминированную функцию T_i необходимо обратно прибавить к отфильтрованному сигналу. Таким образом, математическая запись процедуры цифровой фильтрации TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса выражается формулой:

$$S = F(w(t) F^{-1}(S_{F0} - T)) + T, \quad (4)$$

где T – функция предсказания, дискретные значения которой определены в массиве T_i .

Так как значения в массиве S_{0i} определяются не только измеряемой величиной S , но и аддитивной помехой, источник которой расположен на некотором расстоянии от измеряемого образца, определить функцию T , а именно определить точные значения измеряемой величины на границах диапазона частот сразу невозможно. Необходимо выделить значения измеряемой величины S на фоне аддитивных помех. Так как источник полезного сигнала и источники помех разнесены в пространстве, а результатом измерений является интерференция этих сигналов, суммарный сигнал S_0 представляет собой быстро осциллирующую функцию. Для обработки таких функций во всех современных ВАЦ используют процедуру их усреднения скользящим средним, которая записывается итерационной формулой:

$$T'_{ik} = \sum_{j=-n}^{j=+n} \frac{T'_{(i+j)k-1}}{n+1}, \quad k = 2 \dots K, \quad (5)$$

где n – число точек усреднения; K – количество итераций при усреднении; $T'_{i1} = S_{0i}$.

При использовании в ВАЦ процедуры сглаживания измеренного сигнала скользящим средним количество итераций K и число точек n обычно выбирается оператором таким образом, чтобы осцилляции частотной зависимости измеряемой величины отсутствовали. Чем больше количество итераций K и/или число точек n , тем больше уменьшается амплитуда аддитивной помехи. Вычислить уровень уменьшения амплитуды аддитивной помехи за одну итерацию при заданном количестве точек усреднения (полосы частот усреднения Δ) можно по формуле, которая получается из определения скользящего среднего:

$$S_{nois\ k+1} = S_{nois\ k} \frac{2c \sin\left(\frac{2\pi d_{nois} \Delta}{c}\right)}{2\pi d_{nois} \Delta}, \quad (6)$$

где d_{noise} – расстояние от источника аддитивной помехи до измеряемого образца.

Преимущества и недостатки процедуры сглаживания сигналов скользящим средним хорошо известны и в данной работе не рассматриваются. В данной работе эта процедура используется с целью определения функции предсказания T для подавления эффекта Гиббса.

2. Численное моделирование цифровой обработки сигнала TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса

Моделирование обработки сигналов во временной области будем осуществлять с использованием частотных зависимостей коэффициентов отражения или пропускания двух вариантов образцов. Измеряемый диапазон частот f выберем от 2 до 24 ГГц. При моделировании процедуры TimeDomain будем использовать сигнал с аддитивной помехой, источник которой расположен на расстоянии $d_{noise} = 1$ м от источника самого сигнала. Аддитивная помеха имеет амплитуду S_{noise} минус 20 дБ во всём диапазоне частот (уровень указан относительно величины S_{resp}):

$$S_0 = (S_{0\text{ meas}} + S_{nois} \exp(-j_m \omega d_{nois})) \exp(j_m \omega d), \quad (7)$$

где j_m – мнимая единица; ω – круговая частота; d – расстояние, на которое сдвигается сигнал во временной области для удобства отображения на графике.

В качестве измеряемой величины $S_{0\text{ meas}}$ при моделировании процедуры TimeDomain в первом примере используется коэффициент пропускания диэлектрической пластины толщиной 2,0 мм с диэлектрической проницаемостью 3,8 без электрических потерь. При моделировании размерность N массива S_0 принимается равной 2001, а размерность M массива для использования процедуры быстрого преобразования Фурье принимается равной 4096.

На рисунке 1 представлены сигналы S'_0 и S_0 во временной области. Значение времени на графике представлено в виде дистанции l . Можно увидеть, что сигнал S'_0 обладает существенно меньшей длительностью, чем сигнал S_0 , что при использовании достаточно узкой оконной функции позволяет терять существенно меньше полезной информации обрабатываемого сигнала, что, в свою очередь, приводит к уменьшению эффекта Гиббса после проведения процедуры TimeDomain.

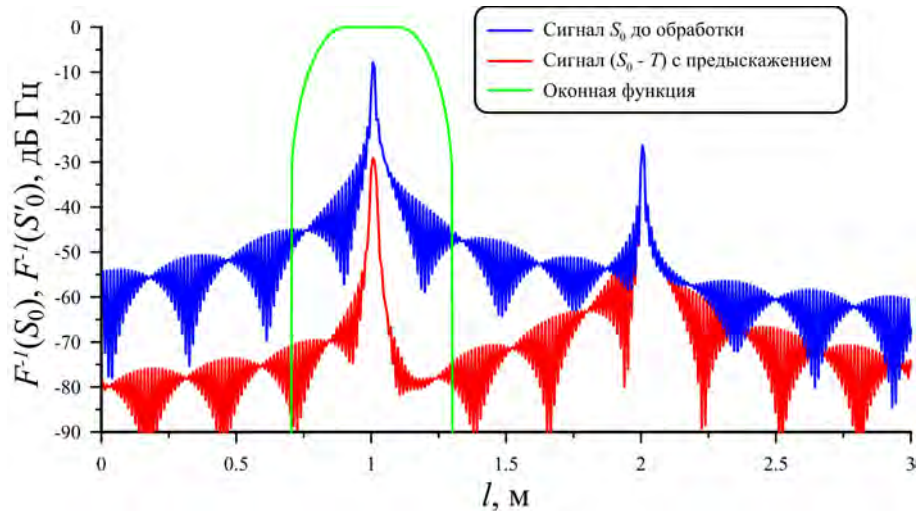


Рисунок 1 – Сигналы S_0 (синяя кривая) и S'_0 (красная кривая) во временной области при проведении цифровой фильтрации TimeDomain

На рисунке 2 приведены сигналы в частотной области f , обработанные по формуле (4) – с подавлением эффекта Гиббса и по формуле (2) – без подавления эффекта Гиббса, с применением оконной функции, полученной с помощью свёртки оконной функции Кайзера и прямоугольной оконной функции. Эта функция отлична от нуля только при значениях l от 0,7 до 1,3 м, а при других значениях l она равна нулю.

Из приведённых на рисунке 2 графиках видно, что сигнал, отфильтрованный с помощью процедуры TimeDomain без подавления эффекта Гиббса, существенно (более чем на 5 дБ по амплитуде и 2° по фазе) отличается от истинного сигнала в поддиапазонах частот от 2 до 4 ГГц и от 22 до 24 ГГц. При удлинении оконной функции с целью уменьшения погрешностей в обработанном сигнале часть энергии аддитивной помехи искажает окончательный результат измерений.

При применении процедуры TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса с помощью предсказывающей функции T , определённой в формуле (3), результирующий сигнал S практически во всём

измеряемом диапазоне частот совпадает с истинным сигналом S_{0meas} . Исключение составляют два поддиапазона частот шириной по 0,4 ГГц в начале и в конце измеряемого диапазона. Здесь в обработанном сигнале наблюдаются погрешности по амплитуде 0,15 дБ и по фазе $0,2^\circ$. Указанные погрешности связаны с остаточным эффектом Гиббса, который возникает из-за погрешности определения начального и конечного значений предсказывающей функции T . Из-за наличия помехи при использовании сглаживания скользящим средним точно определить начальное и конечное значения истинной функции невозможно. При больших амплитудах помехи такая погрешность будет большой, соответственно, чем меньше уровень помехи, тем остаточный эффект Гиббса будет меньше при использовании такой процедуры его подавления.

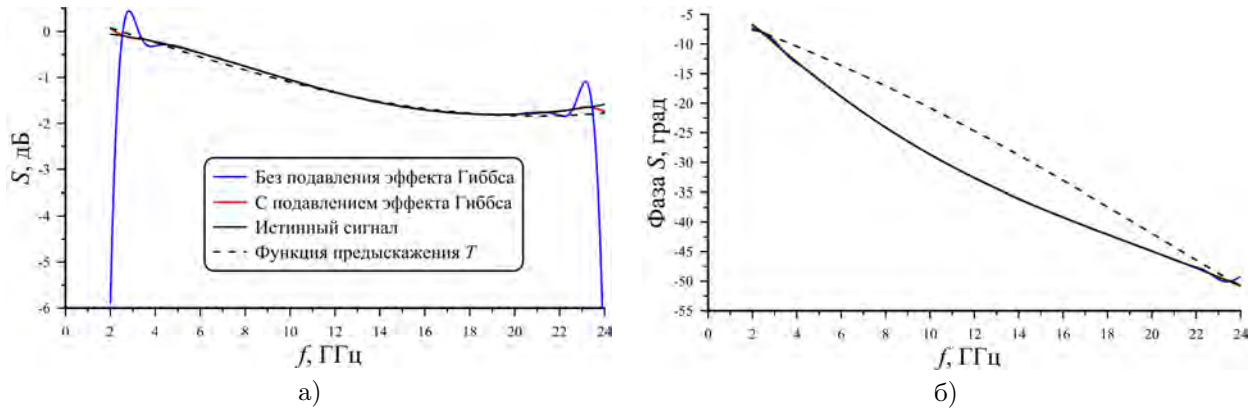


Рисунок 2 – Сигнал в частотной области f после проведения процедуры цифровой фильтрации TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса и без подавления эффекта Гиббса (а – модуль; б – фаза, штриховая кривая – функция предсказания T ; истинный сигнал S_{0meas} – чёрная кривая; сигнал после обработки с подавлением эффекта Гиббса - красная кривая; сигнал после обработки без подавления эффекта Гиббса - синяя кривая)

В рассмотренном примере эффект Гиббса возникает из-за наличия большого перепада в обрабатываемом с помощью процедуры TimeDomain сигнале на границах измеряемого диапазона. Если в процедуре цифровой обработки TimeDomain использовать дискретное преобразование Фурье при равных значениях N и M , т.е. при одинаковой размерности массивов S_0 и S_{F0} , эффект Гиббса не будет наблюдаться только в том случае, если на границах частотного диапазона значения истинного сигнала без аддитивных помех будут равны. В общем случае, в той или иной степени эффект Гиббса, если его не подавлять, всегда будет влиять на точность результатов измерений при их цифровой обработке.

Вместо предсказывающей функции T , которая использовалась в предыдущем примере для подавления эффекта Гиббса, можно было бы использовать функцию T' , которая получается после применения процедуры усреднения измеряемой величины S_0 скользящим средним. При достаточно гладких частотных зависимостях S-параметров образцов эффективность применения обеих предсказывающих функций будет одинаковой для подавления эффекта Гиббса. Рассмотрим случай, когда в частотной зависимости S-параметров образца наблюдается узкополосный резонанс, т.е. коэффициент пропускания или отражения резко изменяется в узком поддиапазоне частот. В этом случае при обратном преобразовании Фурье полученный сигнал также обладает большой длительностью, а процедура подавления эффекта Гиббса при использовании предсказывающей функции T будет недостаточно эффективной. Для более эффективного подавления эффекта Гиббса предлагается использовать предсказывающую функцию T' . Примером такой частотной зависимости S-параметра может служить частотная зависимость коэффициента отражения (КО) некоторой периодической структуры – частотно-избирательной решётки (ЧИР).

В частотных зависимостях S-параметров ЧИР могут существовать узкополосные резонансы. На примере такой частотной зависимости КО ЧИР рассмотрим процедуру подавления эффекта Гиббса при использовании двух предсказывающих функций T и T' . На рисунке 3 во временной области приведены в сумме с аддитивной помехой (как в предыдущем примере) сигнал S_0 , а также сигналы S'_0 при использовании функций предсказания T и T' . При наличии в сигнале узкополосного резонанса его длительность во временной области существенно больше, чем длительность сигнала без резонансов. Это обстоятельство приводит к тому, что при использовании узкой оконной функции в TimeDomain наблюдаются погрешности после обработки практически во всём диапазоне частот измерения.

На рисунке 4 приведена обработанная методом TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса (при использовании предсказывающих функций T и T') частотная зависимость КО ЧИР в том поддиапазоне частот, в котором наблюдается в ней узкополосный резонанс. Помеховая обстановка (расстояние между источниками сигнала и помехи, а также амплитуда помехи), диапазон частот и длительность оконной

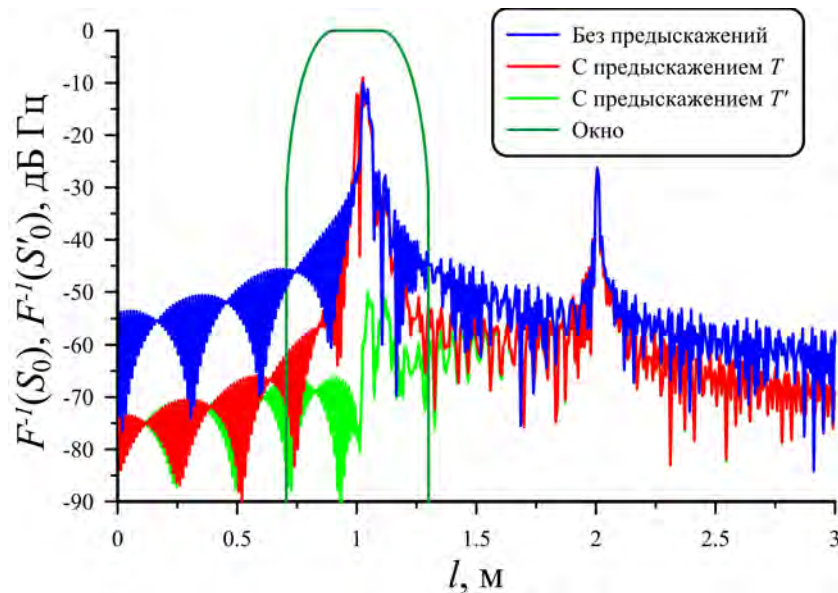


Рисунок 3 – Сигнал во временной области S_0 (синяя кривая), а также сигнал во временной области S'_0 при использовании функций предсказания T (красная кривая) и T' (зелёная кривая)

функции при моделировании алгоритма обработки сигнала в этом примере использовались такие же, как в предыдущем примере. Также на рисунке 4 приведена истинная частотная зависимость ЧИР и предсказывающая функция T' , которая определяется с помощью усреднения скользящим средним при следующих параметрах функции (5): $n = 5$ дискретов, $K = 30$ итераций. При таких параметрах усреднения сигнала с аддитивной помехой скользящим средним в соответствии с формулой (6) амплитуда аддитивной помехи уменьшается на 2 дБ. Графики на рисунке 4 демонстрируют, что функция предсказания T' , которая получается при использовании усреднения сигнала с помехой скользящим средним хоть и близка к истинному сигналу, но содержит погрешность. Частотная зависимость КО ЧИР, полученная при использовании предсказывающей функции T , демонстрирует, что в достаточно широком поддиапазоне частот невозможно с высокой точностью выделить истинный сигнал даже при подавлении эффекта Гиббса. Использование функции T' для подавления эффекта Гиббса позволяет с высокой точностью (с погрешностью менее 0,01 дБ) восстановить истинный сигнал во всём измеряемом диапазоне частот за исключением его границ, где наблюдается остаточный эффект Гиббса, а также поддиапазона частот самого узкополосного резонанса.

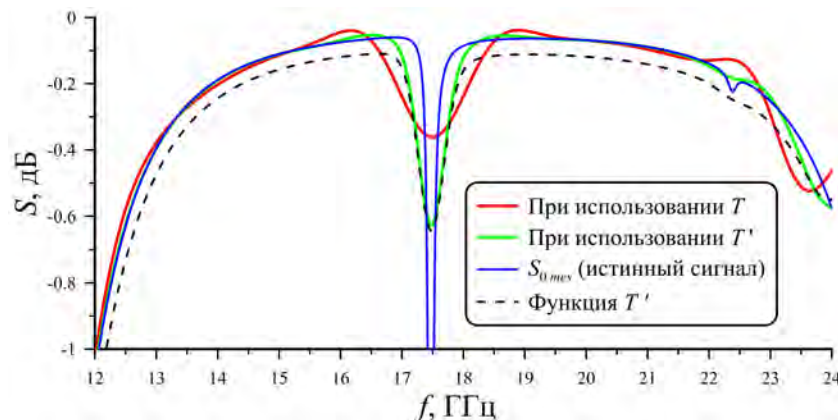


Рисунок 4 – Частотная зависимость КО ЧИР после проведения цифровой фильтрации TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса при использовании предсказывающих функций T (красная кривая) и T' (зелёная кривая) (истинный сигнал – синяя кривая; функция T' – штриховая кривая)

3. Применение процедуры TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса в реальной измерительной установке

В этом разделе главы демонстрируется эффективность подавления эффекта Гиббса при проведении процедуры временной селекции сигналов TimeDomain в реальном измерительном стенде.

На рисунке 5 представлены измеренные частотные зависимости модуля коэффициента пропускания (КП) образца плавленого кварца толщиной 4.2 мм и диэлектрической проницаемостью 3.8, обработанные с помощью стандартной цифровой обработки TimeDomain без подавления эффекта Гиббса и с подавлением эффекта Гиббса с помощью предсказывающей функции T . Видно, что использование процедуры подавления эффекта Гиббса позволяет исключить погрешности на границах измеряемого диапазона частот. Остаточный эффект Гиббса после его подавления в результатах измерений в данной частотной зависимости практически незаметен (погрешность менее 0.05 дБ). Без использования процедуры подавления эффекта Гиббса в поддиапазонах частот от 2 до 4.5 и от 21.5 до 24 ГГц в обработанном сигнале наблюдаются погрешности, которые достигают 3.5 дБ, т.е. отношение рабочей верхней частоты к рабочей нижней частоте уменьшается от 12 до 4.8 раз.

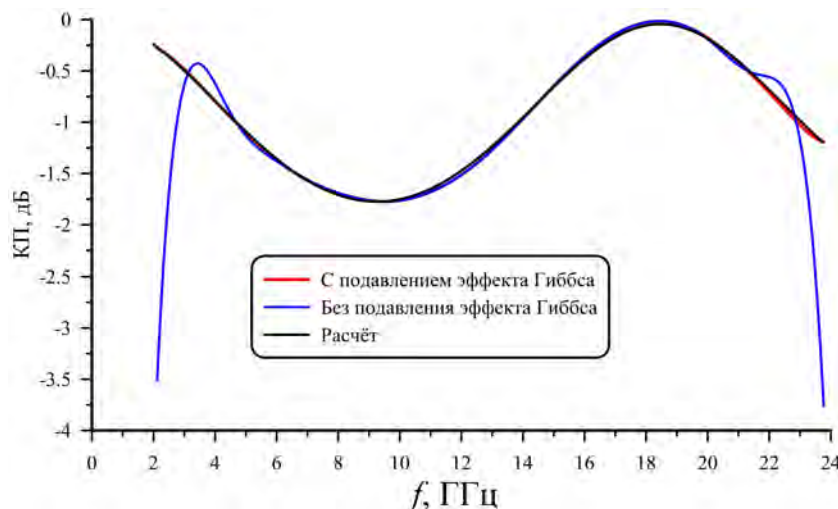


Рисунок 5 – Измеренная частотная зависимость модуля коэффициента пропускания образца плавленого кварца при использовании процедуры подавления эффекта Гиббса (красная кривая) и без подавления эффекта Гиббса (синяя кривая) (рассчитанная зависимость – чёрная кривая)

4. Обсуждение предложенного способа подавления эффекта Гиббса в измерительной установке

Представленные в предыдущих разделах результаты численного моделирования и измерений демонстрируют существенное повышение точности измерений S-параметров образцов при использовании предлагаемого способа подавления эффекта Гиббса при цифровой обработке TimeDomain. Предлагаемые функции предсказания T и T' , которые необходимо использовать в описанном способе, демонстрируют одинаковую эффективность, если измеренные частотные зависимости S-параметров образцов являются достаточно гладкими. В случае если в частотных зависимостях S-параметров образцов наблюдаются узкополосные резонансы, более точно восстановить измеренные сигналы на фоне аддитивных помех позволяет способ подавления эффекта Гиббса с использованием функции предсказания T' , которая определяется по формуле (5).

К сожалению, восстановить точно измеренные сигналы в поддиапазонах частот, в которых наблюдаются узкополосные резонансы в виде резких изменений S-параметров, не удаётся даже при использовании функции предсказания T' . Для того, чтобы восстановить истинный сигнал в поддиапазоне частот узкополосных резонансов, необходимо вместо оконной функции, выделяющей сигнал на фоне аддитивных помех, использовать оконную функцию, которая исключает аддитивные помехи с высоким уровнем амплитуд из результатов измерений. В итоге при использовании цифровой фильтрации TimeDomain практически весь полезный сигнал во временной области используется для восстановления сигнала в частотной области. Таким образом, возможно достаточно точно восстановить истинный сигнал в поддиапазоне частот резонанса, но в ущерб точности восстановления сигнала в остальных поддиапазонах частот.

Заключение

В статье представлена процедура подавления эффекта Гиббса при цифровой обработке результатов измерений TimeDomain с помощью введения предсказаний в обрабатываемый сигнал в виде

некоторой детерминированной функции. Вычитание специальной предсказывающей функции из полезного сигнала с аддитивной помехой позволяет существенно укоротить этот сигнал во временной области, что, в свою очередь, позволяет использовать более узкую фильтрующую оконную функцию при проведении временной селекции полезного сигнала от сигнала помехи. Это обстоятельство существенно повышает точность воспроизведения результатов измерений на фоне аддитивных помех.

Продемонстрирован способ повышения точности измерений S-параметров образцов, обладающих узкополосным резонансом. Наличие в частотной зависимости S-параметров образца узкополосного резонанса, а именно резкого изменения их значений в узком поддиапазоне частот, существенно удлиняет измеренные сигналы во временной области, что, в свою очередь, ухудшает результаты их обработки после временной селекции. Для повышения точности воспроизведения истинного сигнала, в котором существует узкополосный резонанс, предлагается использовать предсказывающую функцию, получаемую из измеренного сигнала на фоне аддитивной помехи путём процедуры его усреднения скользящим средним.

Также в статье приведены результаты обработки измерений частотной зависимости коэффициента пропускания образца плавленого кварца и значений диэлектрической и магнитной проницаемостей образца композитного материала с помощью процедуры TimeDomain с подавлением эффекта Гиббса и без его подавления. Данные результаты обработки измерений демонстрируют эффективность предложенного в статье способа повышения точности реального измерительного стенда в реальной помеховой обстановке.

Список литературы

- [1] Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях / М.: Мир, 1983. Том 1. 312 с.
- [2] Хемминг Р.В. Цифровые фильтры / М.: Недра, 1987. 221 с.
- [3] Gibbs J. W. Nature / London, 59, 1899. P. 606.
- [4] Семенов В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника, 2019. № 2. С. 55—59 DOI:10.32446/0368-1025it.2019-2-55-59.
- [5] Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A. and Baskov K.M. Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // Measurement Techniques, 2019. Vol. 62. № 2. May. Pp. 161—166. DOI:10.1007/s11018-019-01601-5.
- [6] Cheh Pan. Gibbs phenomenon removal and digital filtering directly through the fast Fourier transform // IEEE Transactions on Signal Processing, 2001. Vol. 49(2). March. P.P. 444 – 448. DOI:10.1109/78.902128.