

Усовершенствование метода фурье-голографии в микроволновом диапазоне на основе экстраполяции с применением метода минимума длительности

О. С. Антропов, В. Ф. Борулько, С. М. Вовк, О. О. Дробахин

*Днепропетровский национальный университет,
пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49010, Украина
E-mail: osantropov@gmail.com, drobakhino@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 6 января 2009 г.

Предложена модификация метода фурье-голографии для восстановления комплексной частотной зависимости коэффициента отражения слоистой диэлектрической структуры, заключающаяся в проведении экстраполяции частотной зависимости квадрата модуля коэффициента отражения на первом этапе обработки сигнала. Экстраполяция проводится в предположении финитности носителя синтезированного сигнала во временной области, при этом требуется минимизировать носитель. После процедуры экстраполяции в частотной области упрощается выбор весовой функции для извлечения временного сигнала, соответствующего собственно структуре, из временной характеристики отражения. Для решения задачи экстраполяции используется метод минимума длительности.

Введение

Задачи послойного определения толщин и диэлектрических проницаемостей материалов, установления местоположений неоднородностей в диэлектрических структурах с последующим их распознаванием по данным измерений отраженного электромагнитного сигнала возникают во многих приложениях. Одной из актуальных проблем является контроль качества изделий из слоистых композиционных материалов, которые нашли широкое применение в современном машиностроении [1]. Для обеспечения локальности измерений необходимо переход к электромагнитным волнам сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Особое место занимает задача контроля качества антенных укрытий и обтекателей. Для этой задачи частотный диапазон не может быть произвольным, а определяется рабочим диапазоном антенны.

Необходимость определения совокупности параметров обуславливает необходимость

измерения на многих частотах. При этом непосредственно производится измерение внесенного коэффициента отражения (КО) (т. е. КО в измерительном тракте), а не КО от собственно исследуемого объекта. Связь внесенного КО с КО собственно слоистой структуры или эффективной площадью отражения радиосигнала (ЭПОР) объектов в свободном пространстве в общем случае имеет сложный характер и требует проведения дополнительных калибровок в свободном пространстве, а также разделения сигналов, полезного и обусловленного отражениями в тракте и антенне. Такое разделение проще осуществить во временной области за счет отличающихся временных задержек для отражений от различных элементов, и поэтому целесообразен переход от частотной зависимости к соответствующей зависимости во временной области (временному сигналу), которые связаны парой преобразований Фурье. Выделение временным окном части временного сигнала (ВС), соответствующего отражению от исследуемого объекта,

с последующим переходом в частотную область позволяет получить частотную характеристику отражения объекта, которая после калибровок дает частотную зависимость КО или ЭПОР.

Достоинством измерений по сетке дискретных частот является возможность осуществления на каждой частоте весовой обработки и фазочастотных регулировок. Это позволяет формировать импульсы оптимальной формы, компенсировать частотную дисперсию тракта и корректировать ряд ошибок на каждой частоте. Если при импульсных измерениях в приемный тракт поступают помехи из всей полосы частот измерений, то при проведении измерений на фиксированных частотах можно обеспечить эффективное подавление шума за пределами узкой окрестности собственно частоты измерений. В [2] рассмотрен метод, основанный на синтезе видеоимпульсного сигнала из гармонических составляющих кратных частот, не превосходящих 500 МГц. Однако такой подход не может быть реализован в микроволновом диапазоне. В [3] вместо отдельных когерентных генераторов был использован один генератор с перестраиваемой частотой, управляемый ЭВМ, которая обеспечивала измерение комплексного КО на многих частотах при помощи автоматического векторного анализатора цепей и построение отраженного сигнала во временной области после соответствующих вычислений, использующих алгоритмы дискретного преобразования Фурье. Визуальный анализ ВС, синтезированных по данным измерений в полосе частот, прост, если нижняя частота мала по сравнению с верхней. При нарушении этого условия интерпретация таких ВС затруднена из-за наличия в нем несущей, совпадающей со средней частотой полосы измерений. Это привело к разработке метода синтеза огибающей радиоимпульсного сигнала [4], базирующегося на концепции аналитического сигнала. Необходимость измерения комплексного внесенного КО требует использования векторных анализаторов цепей. Последние являются дорогостоящими, достаточно громоздкими приборами, которые в большинстве случаев имеют коаксиальный выход, что затрудняет калибровки при переходе к волноводному тракту.

Использование скалярных рефлектометров имеет определенные преимущества, т. к. они

существенно дешевле векторных измерителей и могут быть выбраны конструкции, которые исходно базируются на волноводных элементах. ВС, аналогичный тому, что получают из векторной (комплексной) частотной зависимости характеристики отражения, может быть восстановлен из квадрата модуля спектральной плотности $A(\omega)$ суммы этого сигнала и δ -функции при условии, что во временной области соответствующие сигналы наблюдаются на различных промежутках ([5], с. 75). Это общее свойство преобразования Фурье нашло применение в фурье-голографии [5]. Действительно, между голограммой и получаемыми действительным и мнимым изображениями существует связь в виде преобразования Фурье. Такая же связь существует между частотной зависимостью сигнала $A(\omega)$, являющегося результатом измерений при помощи скалярного интерферометра интерференции исследуемого отраженного и опорного сигналов, и результатом фурье-преобразования $A(\omega)$, т. е. сигналом $a(t)$ во временной области. Указанная идея реализована в [6]. При этом в качестве опорного сигнала использовано отражение от неоднородности, образуемой открытым концом волновода. Частотная зависимость КО открытого конца волновода в полосе пропускания волновода имеет достаточно равномерный характер и по своим свойствам максимально приближается к спектру δ -функции. Выбор расстояния между источником опорного сигнала и объектом исследования, обеспечивающего временной интервал, больший времени прохождения сигнала в исследуемом объекте, позволяет получить искомый ВС. Выполнение указанного требования аналогично выполнению условия Лейта–Упатниекса в традиционной одночастотной голографии [6].

Открытый конец волновода представляет собой антенну с малым коэффициентом усиления. Переход к рупорной антенне, которая является гораздо более эффективным излучателем, приводит к необходимости учитывать два отражения (одно – в переходе от регулярного волновода к рупору, и второе – в апертуре) [7]. По отношению к сигналу, обусловленному отражением собственно от исследуемого объекта, оба указанных отражения могут рассматриваться как опорные, однако при выполнении условий, указанных

в [7], и в этом случае могут быть выделены во временной области сигналы, которые совпадают по структуре с сигналом, полученным путем синтеза из результатов измерений комплексной характеристики на многих частотах. Такой подход реализован в специализированных измерительно-вычислительных комплексах [8].

Применение временных окон [9] позволяет из $a(t)$ выделить необходимый фрагмент ВС (информативные пики), отвечающий собственному исследуемому объекту и совпадающий по структуре с ВС, полученным посредством фурье-преобразования комплексной частотной зависимости. Следовательно, после преобразования указанного фрагмента ВС в частотную область при условии, что информативные и неинформативные пики во временной области наблюдаются раздельно, может быть получена комплексная частотная зависимость характеристики отражения. При недостаточном разделении указанных пиков вследствие недостаточной ширины полосы частот измерений и наложении переходных областей окна на информативные пики результат восстановления комплексной частотной зависимости имеет искажения на краях полосы частот. Для типичных ситуаций при применении окна Баттерворта [9] искажения в сумме занимают 20 % от общей ширины полосы частот 8.5 ГГц. Один из путей совершенствования рассмотренного метода состоит в экстраполяции частотной зависимости сигнала $A(\omega)$ в целях уменьшения длительности пиков ВС для устранения их перекрытия. При условии экстраполяции до нулевой частоты полученный ВС может быть использован для определения профиля диэлектрической проницаемости исследуемого объекта методом Гельфанда–Левитана [10]. Получение комплексной частотной зависимости КО позволяет определять значения толщин и диэлектрических проницаемостей материалов слоев более эффективно [11, 12]. В принципе для проведения спектрального анализа вместо дискретного преобразования Фурье могут быть использованы методы параметрического спектрального анализа [13], которые для КО явно или неявно предполагают справедливость модели в виде суммы взвешенных экспонент. Очевидно, что во всей полосе частот такая модель не может быть справедливой.

В настоящей работе для усовершенствования методов восстановления комплексной частотной характеристики отражения по данным измерения амплитудной характеристики путем проведения ее экстраполяции предлагается применить принцип неквадратичной регуляризации на основе метода минимума длительности (ММД) [14, 15], ранее использованный [16] для решения задачи повышения разрешающей способности метода синтеза ВС на основе фурье-преобразования комплексной частотной зависимости. Модель ВС в виде суммы δ -функций возникает как предельный случай при экстраполяции на всю полосу частот. При экстраполяции на конечную полосу частот в принципе могут быть сохранены те свойства сигнала, которые имеют место в полосе частот измерения.

Задача экстраполяции частотной зависимости характеристики отражения

Рассмотрим для простоты случай, когда имеется одна опорная неоднородность с коэффициентом отражения r_0 , отстоящая от исследуемой структуры на расстояние, соответствующее временному интервалу t_0 . Измеренный в частотной области сигнал для случая квадратичного детектора может быть описан следующим образом [6]:

$$A(\omega) = k \left(|r_0 \exp(j\omega t_0) + R(\omega)|^2 \right) = k \left(|r_0|^2 + r_0^* R(\omega) \exp(-j\omega t_0) + r_0 R^*(\omega) \exp(j\omega t_0) + |R(\omega)|^2 \right), \quad (1)$$

где $R(\omega)$ – коэффициент отражения исследуемого объекта, k – коэффициент преобразования, символом “*” обозначены комплексносопряженные величины. Последнее слагаемое в правой части (1) является спектром автокорреляционной функции (АКФ) отклика исследуемой структуры, второе слагаемое несет требуемую информацию и соответствует взаимокорреляционной функции (ВКФ) откликов структуры и опорной неоднородности. Выделение этой

части сигнала может быть проведено во временной области окном при условии, что соответствующие ВКФ и АКФ принадлежат различным временным интервалам и не перекрываются друг с другом. Из-за конечности полосы частот измерений пики, соответствующие ВКФ и АКФ, имеют определенную протяженность и некоторое перекрытие. Обеспечение финитности сигналов отражения от границ раздела слоев позволяет усовершенствовать метод восстановления комплексной частотной зависимости характеристики отражения слоистой диэлектрической структуры по данным измерения частотной зависимости $A(\omega)$ [9]. Предположение о финитности синтезированного ВС позволяет провести экстраполяцию спектра и получить ВС с хорошо разделяющимися АКФ и ВКФ, при этом упрощается выбор оптимального окна для выделения необходимого фрагмента ВС, отвечающего собственно исследуемой слоистой структуре. В частности, представляется возможным использовать непосредственно прямоугольное окно, и при этом не возникает искажений, обусловленных эффектом Гиббса.

Задачу экстраполяции частотной зависимости характеристики отражения $A(\omega)$ формулируем следующим образом – необходимо найти такую функцию $A(\omega)$, чтобы выполнялись следующие условия:

– синтезированный временной сигнал $a(t)$, получаемый с использованием обратного преобразования Фурье функции $A(\omega)$, должен иметь как можно меньшую длительность, т. е. иметь минимальный носитель, причем не требуется информации о его положении на оси времени;

– среднеквадратическое отклонение функции $A(\omega)$ от измеренной зависимости $A_n(\omega)$ в пределах полосы частот измерений не должно превосходить величину σ (таким образом принимается в расчет погрешность измерений).

Критерием решения является достижение минимума длительности синтезированного ВС, при этом для описания длительности сигнала $a(t)$ используется так называемый функционал “квазидлительности” [14, 15] сигнала $a(t)$ на интервале наблюдения $[-T/2, T/2]$:

$$D_{\alpha,\beta}(a(t)) = \int_{-T/2}^{T/2} \left\{ \left[|a(t)/\lambda|^2 + \alpha^2 \right]^\beta - \alpha^{2\beta} \right\} dt. \quad (2)$$

Здесь α, β – параметры функционала $D_{\alpha,\beta}$, которые можно выбрать так [7]: $\alpha \approx \sigma/\lambda$, где σ – дисперсия шума; $\beta = 1/16$; $\lambda = \max\{|a(t)|\}$.

Соответствующая задача экстраполяции с применением регуляризации на основе функционала “квазидлительности” формулируется следующим образом:

$$\int_{\Omega_n}^{\Omega_b} |A(\omega) - A_n(\omega)|^2 d\omega + \gamma D_{\alpha,\beta} \left(\int_{\Omega_n}^{\Omega_b} A(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right) \rightarrow \min_{A(\omega)}, \quad (3)$$

где $\gamma > 0$ – параметр регуляризации, $[\Omega_n; \Omega_b]$ – частотный диапазон измерений. Первое слагаемое в (3) определяет энергию невязки искомым и измеренной функций, а второе слагаемое осуществляет регуляризацию ВС по длительности. Заметим, что границы интегрирования обратного преобразования Фурье при синтезировании ВС (второе слагаемое функционала (3)) следует выбирать с учетом особенностей измерения частотной зависимости $A(\omega)$ и синтезирования ВС: для рассматриваемого случая измерений в широкой полосе частот в СВЧ диапазоне целесообразно синтезирование огибающей радиоимпульса на основе спектра аналитического сигнала, поэтому интегрирование в преобразовании Фурье производится в пределах $[\Omega_{\text{нн}}; \Omega_{\text{вб}}]$ с последующим вычислением модуля, где $\Omega_{\text{нн}}$ – нижняя граница частотного диапазона экстраполяции, а $\Omega_{\text{вб}}$ – верхняя. Использование малых γ приводит к решению без регуляризации по длительности, в то же время увеличение до очень больших значений приводит к тому, что минимум функционала (3) достигается в случае равенства функции $a(t)$ нулю, т. е. к получению сигнала нулевой длительности. Выбор большого значения параметра γ позволяет удалить из восстановленного сигнала второстепенные детали, однако для сохранения тонких деталей истинного сигнала значение γ не должно быть слишком велико.

Численное моделирование

На численном примере исследуем возможность повышения разрешающей способности ВС путем экстраполяции спектра. Амплитудная характеристика отражения была вычислена согласно формуле (1) для однослойной структуры толщиной 4 см с диэлектрической проницаемостью материала 2.6 в частотном диапазоне $20.0 \div 25.2$ ГГц с шагом 100 МГц в присутствии гауссова шума с отношением сигнал/шум на уровне 20 дБ (рис. 1, а), при этом соответствующий ВС показан на рис. 1, б. Значения параметров для опорной неоднородности были заданы следующим образом: коэффициент отражения $r_0 = 0.24$, расстояние между опорной неоднородностью и структурой $d_0 = 20$ см. После проведения экстраполяции зависимости $A(\omega)$, обеспечивающей трехкратное расширение полосы частот, в синтезированном ВС влияние наложений функций типа $\sin x/x$, соответствующих информативным пикам ВКФ структуры и опорной неоднородности и АКФ структуры, а также переотражений было минимизировано (рис. 1, в, г) и для анализа ВС затем использовалось прямоугольное окно. При этом $r(t)$ является ВС, синтезированным из $R(f)$ при помощи преобразования Фурье, а $|r(t)|$ – огибающей соответствующего ВС. После нормировки на r_0 была найдена комплексная частотная зависимость коэффициента отражения, при этом оценки параметров пиков, определенные по ВС структуры ($|A_1| = 0.229$, $|A_2| = 0.204$, расстояние $\Delta z = 12.6$ см) хорошо согласуются с результатами прямого расчета ($|A_1| = 0.234$, $|A_2| = 0.208$, расстояние $\Delta z = 12.9$ см). Такие значения параметров пиков позволили получить следующие оценки параметров слоя: $\varepsilon = 2.54$, $d = 3.95$ см. На рис. 1, д и рис. 1, е приведены результаты восстановления комплексной частотной зависимости характеристики отражения в сравнении с результатами численного расчета. Погрешность восстановления модуля частотной зависимости коэффициента отражения не превышает 1 %, а по фазе составляет менее 1.2° , что свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода.

Обработка экспериментальных данных

Экспериментальные результаты были получены для структуры оргстекло–воздух–оргстекло со значениями толщины слоев оргстекла 41 мм и толщины воздушного зазора 40 мм. Поскольку применение рупорной антенны вместо открытого конца волновода позволяет проводить измерения на больших расстояниях, в качестве излучателя был использован пирамидальный рупор. В нем формируются два отражения, причем отражение в горловине доминирует, оно и было использовано как основной опорный сигнал [7]. Измерения амплитудной зависимости $A(\omega)$ (рис. 2, а) было проведено в диапазоне $17.4 \div 25.9$ ГГц, данные измерений в частотной области имеют однородную структуру, за исключением выброса на частоте 19 ГГц. Результат непосредственного синтеза ВС по исходным данным измерений приведен на рис. 2, б. На этой зависимости можно четко выделить область, соответствующую АКФ отражения опорной неоднородности и самой слоистой структуры, и область, соответствующую ВКФ исследуемого коэффициента отражения и основного опорного сигнала. Между этими областями находятся пики, обусловленные ВКФ исследуемой структуры и второго опорного сигнала. Наличие всех этих мешающих пиков, расплывчатая форма каждого из пиков и необходимость устранения явления Гиббса затрудняют выбор оптимального весового окна.

После проведения процедуры экстраполяции при наличии регуляризации согласно (3) в область $0 \div 25$ ГГц (рис. 2, а) соответствующий синтезированный ВС представляет собой набор финитных сигналов (рис. 2, в) в отличие от исходного синтезированного сигнала (рис. 2, б), и теперь можно использовать прямоугольное окно для выделения ВКФ (рис. 2, г) и восстановления комплексной частотной зависимости коэффициента отражения. При этом мешающие пики и пики ВКФ с опорным сигналом в апертуре практически устранены. Наличие выброса в экспериментальных данных (рис. 2, а) не приводит к существенным эффектам в экстраполированных данных. На рис. 2, д и рис. 2, е приведены результаты восстановления комплексной частотной зависимости характеристики от-

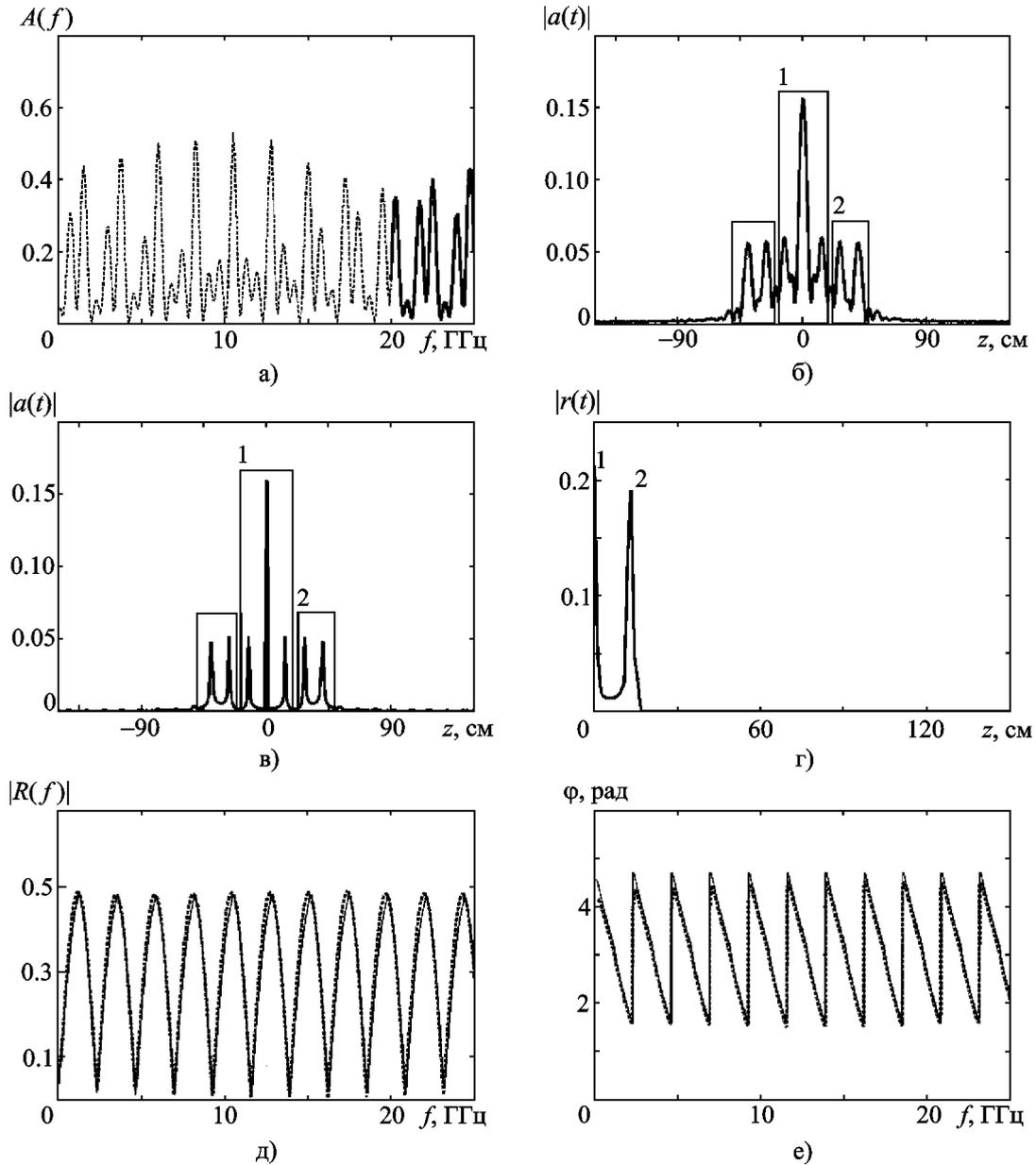


Рис. 1. Результаты численного моделирования регуляризирующей экстраполяции согласно ММД для случая одной опорной неоднородности:

а) – зависимость $A(f)$ (— – измеренные данные в диапазоне $18 \div 21$ ГГц, --- – экстраполированные данные);

б) – огибающая ВС, синтезированного по измеренной амплитудно-частотной зависимости типа $A(\omega)$ в диапазоне $20 \div 25$ ГГц (1 – АКФ отклика слоистой структуры, 2 – ВКФ откликов структуры и опорной неоднородности);

в) – огибающая ВС, синтезированного по экстраполированной амплитудно-частотной зависимости типа $A(\omega)$ в диапазоне $0 \div 25$ ГГц (1 – АКФ отклика слоистой структуры, 2 – ВКФ откликов структуры и опорной неоднородности);

г) – огибающая восстановленного ВС (1 – отражение от передней грани однослойной структуры, 2 – отражение от задней грани структуры);

д) – зависимость $|R(f)|$ (— – результат численного расчета, --- – результат восстановления предлагаемым методом);

е) – зависимость $\varphi(f)$ (— – результат численного расчета, --- – результат восстановления предлагаемым методом)

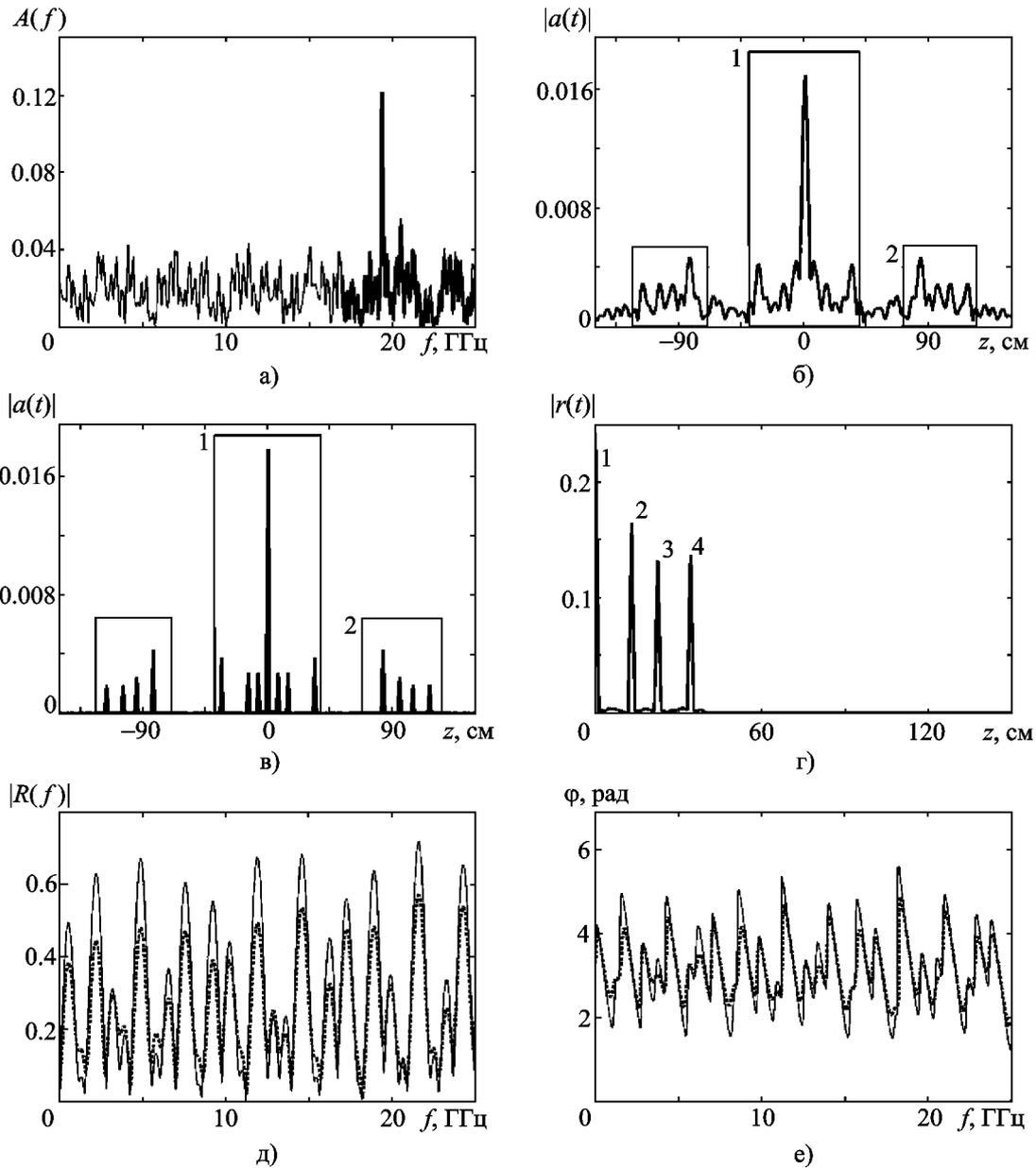


Рис. 2. Результаты применения регуляризирующей экстраполяции согласно ММД при использовании в качестве основного опорного сигнала отражения в горловине рупора:

а) – зависимость $A(f)$ (— – измеренные данные в диапазоне $17 \div 25$ ГГц, --- – экстраполированные данные);

б) – огибающая ВС, синтезированного по измеренной амплитудно-частотной зависимости типа $A(\omega)$ в диапазоне $17 \div 25$ ГГц (1 – АКФ отклика слоистой структуры, 2 – ВКФ откликов структуры и опорной неоднородности);

в) – огибающая ВС, синтезированного по экстраполированной амплитудно-частотной зависимости типа $A(\omega)$ в диапазоне $0 \div 25$ ГГц (1 – АКФ отклика слоистой структуры, 2 – ВКФ откликов структуры и опорной неоднородности);

г) – огибающая восстановленного ВС (1, 2, 3, 4 – отражения от границ раздела сред структуры);

д) – зависимость $|R(f)|$ (— – результат численного расчета по известным параметрам структуры, --- – результат восстановления предлагаемым методом);

е) – зависимость $\varphi(f)$ (— – результат численного расчета по известным параметрам структуры, --- – результат восстановления предлагаемым методом)

ражения в сравнении с результатами численного расчета по известным оценкам параметров диэлектрической структуры. Относительная погрешность восстановления модуля коэффициента отражения составила 5.5 %, а для фазы погрешность составила 3.41°. Это достаточно хороший результат с учетом того, что расчетная модель не учитывает потери и эффект расходимости излучения. Недостатком предложенного подхода является необходимость “тонкого” выбора параметра регуляризации γ и параметра α функционала (2) ввиду наличия большого числа компонент в синтезированном ВС, являющемся суммой АКФ и ВКФ. В качестве альтернативы может быть изначально применено временное окно “с запасом”, позволяющее выделить фрагмент ВС с какой-то частью мешающих пиков, и лишь затем проведена экстраполяция обработанного таким образом сигнала.

Выводы

Результаты численного моделирования и обработки экспериментальных данных показали, что применение предложенного метода экстраполяции является целесообразным для обеспечения улучшения качества восстановления частотной зависимости комплексного коэффициента отражения диэлектрической структуры методом фурье-голографии. При этом, в отличие от известных методов экстраполяции, он не требует строгого соответствия данных выбранной модели в виде суммы комплексных экспонент или точной информации о носителе в фурье-сопряженной области. Единственное требование разработанного подхода – минимальная длительность синтезированного ВС. Другой важной особенностью метода является его устойчивость к наличию помех, обусловленных погрешностями измерений, в частности к выбросам в частотной зависимости. Необходимость корректного выбора значений параметров функционала (3) требует проведения тестовых измерений для структур с известными свойствами для определения уровня шумов при конкретных измерениях и на этой основе выбора значений параметров α и γ , которые и используются во всей серии измерений для структур с неизвестными параметрами.

Литература

1. Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько, В. Г. Сітало, Ф. П. Санін, А. Ф. Санін. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці. – К.: Вища освіта, 2003. – 399 с.
2. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. – М.: Сов. радио, 1977. – 176 с.
3. Robinson L. A., Weir W. B., Young G. L. An RF time-domain reflectometer not in real time // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1972. – Vol. MTT-20, No. 4. – P. 855-857.
4. Дробахин О. О., Ахметшин А. М. Оценивание параметров слоистых диэлектрических материалов методом фурье-преобразования комплексного коэффициента отражения // Дефектоскопия. – 1984. – №9. – С. 19-28.
5. Василенко Г. И., Цибулькин Л. М. Голографические распознающие устройства. – М.: Радио и связь, 1985. – 321 с.
6. Борулько В. Ф., Дробахин О. О. Синтезирование временных сигналов из квадрата модуля коэффициента отражения как средство оценивания параметров слоистых диэлектрических структур // Дефектоскопия. – 1986. – №4. – С. 36-42.
7. Дробахин О. О. Реализация метода синтезированной огибающей радиоимпульса по данным амплитудных измерений при использовании рупорной антенны // Дефектоскопия. – 1999. – № 7. – С. 67-74.
8. Alekseev V. V., Drobakhin O. O., Kondrat'ev Ye. V., and Saltykov D. Yu. Microwave introscopy using multifrequency measurements and transversal scan // IEEE Aero. Electron. Syst. Mag. – 2006. – Vol. 21, No. 2. – P. 24-26.
9. Дробахин О. О. Восстановление комплексного коэффициента отражения слоистых структур по данным измерений амплитудных характеристик отражения на многих частотах // Дефектоскопия. – 1999. – № 4. – С. 37-46.
10. Andreev M. V., Drobakhin O. O., Korotkaya V. G., Novomlinov A. G., Sazonov A. V. Modification of the Gelfand-Levitan method for 1-d multylayered structure inverse problem // Radio Phys. Radio Astron. – 2002. – Vol. 7, No. 4. – P. 459-461.
11. Mikhnev V., Vainikainen P.-V. Iterative Step-Like Reconstruction of Stratified Dielectric Media from Multifrequency Reflected-Field Data // Subsurface Sensing Technologies and Applications. – 2000. – Vol. 1, No. 1. – P. 65-78.
12. Андреев М. В., Борулько В. Ф., Дробахин О. О. Сравнительный анализ информационных возможностей методов многочастотного радиоволнового контроля слоистых диэлектрических структур с использованием квазиразрешения // Дефектоскопия. – 1996. – № 2. – С. 77-86.

13. Sarkar T. K., Pereira O. Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials // IEEE Antennas Propag. Mag. – 1995. – Vol. 37, No.1. – P. 48-55.
14. Вовк С. М., Борулько В. Ф. Метод минимума длительности для восстановления финитных сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1991. – Т. 34, № 8. – С. 66-69.
15. Вовк С. М., Антропов О. С., Борулько В. Ф. Определение значений параметров синусоидального сигнала, искаженного неизвестными импульсами // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – Т. 51, № 9. – С. 40-51.
16. Антропов О. С., Борулько В. Ф., Вовк С. М., Дробахин О. О. Экстраполяция частотной зависимости коэффициента отражения слоистой структуры с ограничениями на длительность временного сигнала // Вестник Днепропетровского национального университета (Физика. Радиоэлектроника). – 2008. – Т. 16, №2/1. – С. 19-23.

**Удосконалення методу
фур'є-голографії в мікрохвильовому
діапазоні на основі екстраполяції
із застосуванням методу мінімуму
тривалості**

**О. С. Антропов, В. Ф. Борулько,
С. М. Вовк, О. О. Дробахин**

Пропонується модифікація методу фур'є-голографії для відновлення комплексної частотної залежності коефіцієнта відбиття шаруватої діелектричної структури, що полягає в екстраполяції частотної залежності квадрата модуля коефіцієнта відбиття на першому

етапі обробки сигналу. Екстраполяція виконується у припущенні фінітності носія синтезованого сигналу у часовій області, котрий слід мінімізувати. Після процедури екстраполяції у частотній області спрощується вибір вагової функції для здобуття часового сигналу, що відповідає власне структурі, із часової характеристики відбиття. Для розв'язку задачі екстраполяції використовується метод мінімуму тривалості.

**Improvement of Extrapolation-Based
Microwave Range Fourier Holography
Method Employing the Method
of Minimum of Duration**

**O. S. Antropov, V. P. Borulko,
S. M. Vovk, and O. O. Drobakhin**

Modification of the Fourier holography method for restoration of complex multifrequency reflection coefficient data of layered dielectric structure is proposed, concluding extrapolation of modulus square multifrequency reflection coefficient data at the first step of data processing. Extrapolation is carried out in an assumption that a source of the synthesized time domain signal, this latter to be minimized, is finite. Extrapolation procedure makes it easier to extract informative segment of reflectivity data, which corresponds to the structure, simplifying the choice of weighting function for extraction. Method of minimum of duration is used for solution of extrapolation problem.