

УДК 621.371

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

Днепропетровский национальный университет

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЕННОГО СИГНАЛА

Розглянута задача екстраполяції сигналу з метою підвищення розрізняльної здатності у Фур'є-сполученій області з врахуванням фінітності невідомого носія в ній. Показана ефективність розробленого підходу за допомогою чисельного моделювання, після чого запропонований метод використано до задачі екстраполяції частотної залежності коефіцієнта відбиття шаруватої діелектричної структури з метою визначення її параметрів.

Введение. Дистанционное измерение параметров слоистых диэлектриков является актуальной задачей в ряде прикладных направлений радиофизических исследований, неразрушающего контроля и т. д. В настоящее время широко используемым методом дистанционного измерения слоистых диэлектрических структур является метод широкополосных многочастотных СВЧ-измерений [1; 2]. В рамках этого подхода в начале производится измерение частотной зависимости коэффициента отражения (ЧЗКО) слоистой диэлектрической структуры на выбранной сетке частот. Затем с помощью цифровых методов спектрального анализа производится синтез временной зависимости коэффициента отражения (рефлектограммы), и проводится её интерпретация. В результате обработки могут быть получены оценки количества слоёв, значений их электрических и геометрических толщин, диэлектрической проницаемости материалов слоёв. Однако, в случае сравнительно тонких слоёв, недостаточной ширины полосы частот измерений, а также в присутствии погрешностей измерений точное определение искомым параметров представляет сложности, поскольку требуемое разрешение во временной области сложно обеспечить. Это приводит к расплыванию и наложению информативных пиков обратного преобразования Фурье от ЧЗКО, уменьшая точность получаемых результатов и усложняя их интерпретацию. В этом случае повышение точности оценивания можно обеспечить путём экстраполяции измеренной ЧЗКО в область нижних и верхних частот.

Традиционные подходы к обработке измеренной ЧЗКО основаны на алгоритмах метода Прони и его разновидностей [3; 4]. Такие методы базируются на использовании строгой аддитивной экспоненциальной модели для описания частотной зависимости, что накладывает высокие требования на точность измерений ЧЗКО, а это в реальных условиях представляет трудности. Эмпирические алгоритмы, подобные алгоритму Тартаковского-Гершберга-Папулиса [5; 6], требуют при проведении экстраполяции задания априорной информации о Фурье-сопряжённой области, которая и является предметом оценивания с точки зрения повышения разрешающей способности. Для учёта погрешностей при измерении ЧЗКО, как случайных, так и методических, мы предлагаем использовать идею метода минимума длительности [7; 8] с целью введения адекватной модели синтезированного вре-

менного сигнала, которая не имеет столь строгих ограничений в сравнении с моделью в виде суммы экспонент.

Метод минимума длительности предложен для решения задачи восстановления сигналов с финитным спектром [7]. Его главной идеей является использование понятия «длительность» в качестве неэнергетической меры сигналов конечной протяженности. Так, с целью описания длительности сигнала $s(t)$ введена специальная разрывная функция χ вида $\chi[s(t)]=1$ при $|s(t)| > 0$, в противоположном случае $\chi[s(t)]=0$. В результате применения этой функции получают так называемую «строгую длительность» рассматриваемого сигнала, меру его значений, отличных от нуля. Однако практическое использование функции χ затруднительно, так как в присутствии шума сколь угодно малой дисперсии функция χ не будет никогда принимать нулевые значения. Помимо этого, в силу разрывного характера рассматриваемой функции, её затруднительно использовать в задачах численной оптимизации. Для преодоления указанных сложностей используется аппроксимация функции χ в численных расчётах функцией вида $\psi[s(t)] = [|s(t)/\lambda|^2 + \alpha^2]^\beta - \alpha^{2\beta}$; $0 < \lambda < \infty$, $\beta=1/k$, $k>2$, с управляющими параметрами α , β для контроля вида функции ψ , при этом результат применения функции ψ дает «обобщенную длительность» сигнала $s(t)$.

Постановка задачи. Предлагается использовать идеи метода минимума длительности для задачи экстраполяции измеренной ЧЗКО для повышения точности оценивания параметров диэлектрической структуры по синтезированной временной зависимости коэффициента отражения. Идеальная модель временного сигнала (рефлектограммы) $f(t)$ имеет вид

$$f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \delta(t - t_i). \quad (1)$$

где a_i , t_i – амплитуда и временная задержка i -го отражения/переотражения плоской электромагнитной волны. Таким образом, «идеальная» рефлектограмма представляет собой финитный сигнал. Тогда задача экстраполяции ЧЗКО формулируется следующим образом – необходимо найти такую функцию $F(f)$, чтобы выполнялись условия: 1) обратное преобразование Фурье $f(t)$ функции $F(f)$ финитно; 2) функция $F(f)$ отличается от измеренной ЧЗКО $G(f)$ не более чем на σ (так мы учитываем погрешность измерений). Соответствующая задача минимизации длительности рефлектограммы с ограничениями на измеренную ЧЗКО формулируется следующим образом:

$$D_{\alpha,\beta} = \int_{-T/2}^{T/2} \{ [|f(t)|^2 + \alpha^2]^\beta - \alpha^{2\beta} \} dt \rightarrow \min_{f(t)}, \quad \|F(f) - G(f)\|_{L_2}^2 \Big|_{f_1}^{f_2} \leq \sigma, \quad (2)$$

где $[f_1; f_2]$ – частотный диапазон проведения измерений. Затем задача минимизации с ограничениями может быть преобразована в задачу без ограничений вида

$$\int_{f_1}^{f_2} [F(f) - G(f)]^2 df + \gamma D_{\alpha,\beta} (\int F(f) e^{j2\pi ft} df) \rightarrow \min_{F(f)}. \quad (3)$$

Первое слагаемое функционала (3) оценивает энергию невязки искомой и измеренной функций, а второе слагаемое осуществляет регуляризацию рефлектограммы по длительности. Использование малых γ приводит к решению без регуляризации по длительности, в то же время увеличение γ до очень больших значений приводит к

тому, что минимум функционала (3) достигается в случае равенства функции $f(t)$ нулю, т. е. получаем сигнал нулевой длительности.

Численное моделирование. Рассмотрим в качестве простого численного примера задачу повышения разрешающей способности сигнала, модель которого представлена в виде суммы двух синусоидальных сигналов. Амплитуды синусоид равны $A_1=1.5$ и $A_2=1$, значения нормализованных частот равны $f_1=0.1$ и $f_2=0.125$ в присутствии гауссова шума с соотношением сигнал/шум, равным +5 дБ. Исходный спектр рассматриваемого сигнала и результат 4-кратной экстраполяции, доставляющий минимум функционалу (2) показан на рис. 1,а и 1,б соответственно для следующих значений параметров функционала (2): $\alpha=0.3$, $\beta=1/16$ and $\gamma=0.01$. Значения параметров синусоид, определенные по спектру экстраполированного сигнала, равны: $A_1=1.52$, $A_2=0.97$, $f_1=0.1$, $f_2=0.125$, в то время как на исходном спектре (рис. 1, а) синусоиды визуально не разрешались.

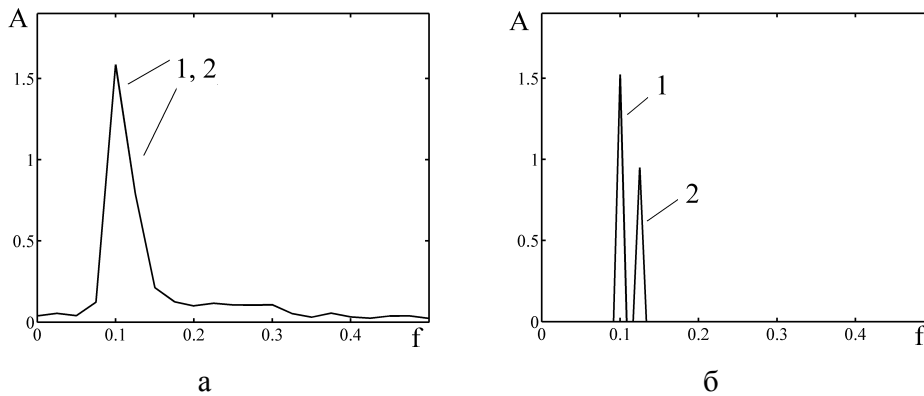


Рис. 1. Спектр суммы двух синусоид (1, 2 – соответствующие спектральные компоненты): а – спектр исходных данных; б – спектр экстраполированного сигнала

Обработка экспериментальных данных. Предлагаемый подход к экстраполяции применён к задаче оценивания параметров (геометрической толщины) слоистой диэлектрической структуры. Экспериментальный образец представлен 3-х слойной структурой оргстекло-воздух-оргстекло со следующими значениями параметров: диэлектрические проницаемости $\epsilon_1=2,6$, $\epsilon_2=2,4$, углы диэлектрических потерь $tg\delta_1=0,006$, $tg\delta_2=0,003$, толщина слоёв оргстекла равна 41 мм, толщина воздушного зазора равна 40 мм. Измерения проводились в диапазоне 19 –23.8 ГГц на дискретной сетке частот с шагом 100 МГц. На рис. 2, а показана измеренная многочастотная зависимость, а на рис. 2, б приведен синтезированный временной сигнал. Временные пики, соответствующие воздушному зазору визуально не разрешаются, не давая возможности определить толщину зазора с достаточной точностью. Результат экстраполяции измеренных данных в частотном диапазоне 16–27.3 ГГц показан на рис. 3, а. На соответствующей временной рефлектограмме (рис. 3, б) пики отражений на границах воздушного зазора визуально различаются. Полученное значение геометрической толщины воздушного зазора равно 38,9 мм.

Выводы. Результаты численного моделирования и обработки экспериментальных данных показали, что предложенный метод экстраполяции с целью повышения разрешающей способности позволяет получать хорошие результаты. При

этом, в отличие от известных методов, он не требует строгой модели измеренных данных или точной информации о носителе в Фурье-сопряженной области, а единственным требованием разработанного подхода является финитность этого неизвестного носителя. Другой важной особенностью метода является его устойчивость к наличию помех, обусловленных погрешностями измерений.

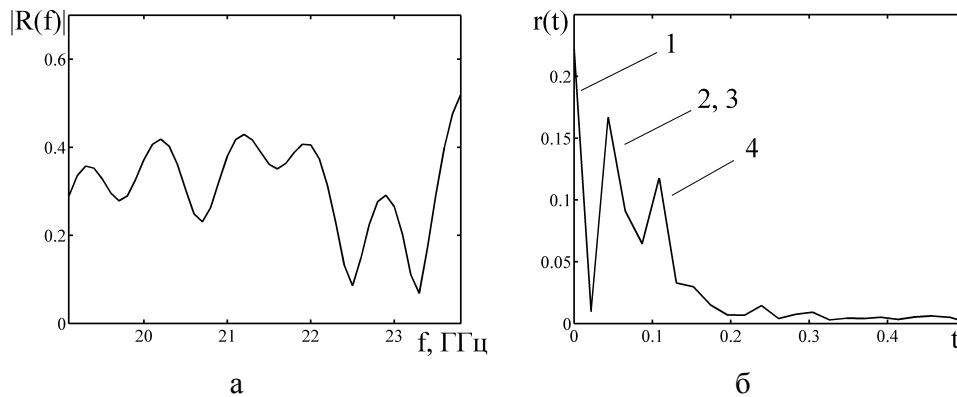


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных: а – измеренная ЧЗКО; б – синтезированный временной сигнал (1 – отражение от передней грани, 2, 3 – на границах слоя воздуха, 4 – от задней грани)

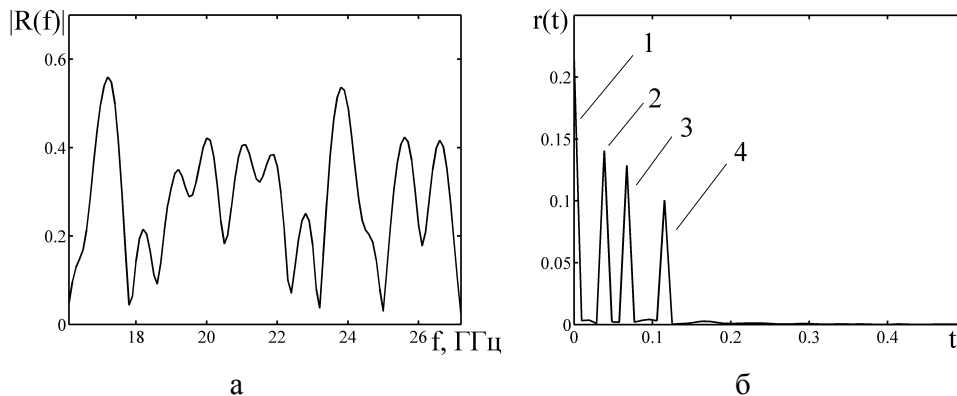


Рис. 3. Результат экстраполяции: а – экстраполированная ЧЗКО; б – синтезированный временной сигнал (1 – отражение от передней грани, 2, 3 – на границах слоя воздуха, 4 – от задней грани)

Рассмотрена задача экстраполяции спектра с целью повышения разрешающей способности в Фурье-сопряженной области с учётом финитности неизвестного носителя в ней. Показана эффективность разработанного подхода посредством численного моделирования, после чего предложенный метод применён к задаче экстраполяции частотной зависимости коэффициента отражения слоистой диэлектрической структуры с целью определения её параметров по синтезированному временному сигналу.

Spectrum extrapolation problem is considered for the purpose of resolution improvement in Fourier-conjugate domain when a priori information about finiteness of temporal signal is present. Effectiveness of developed approach is demonstrated through numerical simulation. Afterwards method is applied for extrapolation problem of complex reflection coefficient data of layered dielectric structure for estimation of layers parameters via synthesized signal in time domain.

Библиографические ссылки

1. **Андреев М. В.** Сравнительный анализ информационных возможностей методов много-частотного радиоволнового контроля слоистых диэлектрических структур с использованием квазиразложения / М.В. Андреев, В.Ф. Борулько, О.О. Дробахин // Дефектоскопия. – 1996, №2. – С. 78–86.
2. **Дробахин О.О.** Оценивание параметров слоистых диэлектрических материалов методом фурье-преобразования комплексного коэффициента отражения / О.О. Дробахин, А.М. Ахметшин // Дефектоскопия. – 1984, – №9. – С.19–28.
3. **Марпл С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., 1990, – С.
4. **Lehmensiek R.** Creating accurate multivariate rational interpolation models of microwave circuits by using efficient adaptive sampling to minimize the number of computational electromagnetic analyses/ Lehmensiek R., Meyer P., // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 49, P. 1419–1430, 2001.
5. **Gerchberg R. W.** Super resolution through error energy reduction, Optica Acta, Vol. 21, №9, P. 709–720, 1974.
6. **Paroulis A.** A new algorithm in spectral analysis and band-limited signal extrapolation // IEEE Trans. Circuits Syst., Vol. CAS-22, P. 735-742, 1975.
7. **Вовк С. М.** Метод минимума длительности для восстановления финитных сигналов / С.М. Вовк, В.Ф. Борулько // Изв.вузов. Радиоэлектроника. – 1991. – Т. 34, №8. – С. 66-69.
8. **Antropov O. S.** Method of minimum of duration for extraction of damped and delayed sinusoidal signals in presence of pulses // Antropov O.S., Vovk S.M., Borulko V.F. // Proceedings of 12th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Lviv, 2007. – P. 203-206.

Надійшла до редколегії 02.12.07