

УДК 537.874 + 537.877 + 621.37

МЕТОДЫ СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД ПО КОНФИГУРАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ В РАДИОВИДЕНИИ

М. С. Костин, П. В. Севрюгин, И. А. Стешин

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

Статья поступила в редакцию 9 июля 2019 г.

Аннотация. Рассмотрены радиофизические особенности применения сверхкоротких импульсов нестационарной конфигурации в решении радиотехнических задач радиоволновой идентификации параметров материальных сред. Определены основные реперные идентификаторы, позволяющие произвести анализ радиоизображений эквивалентных неоднородностей среды с субнаносекундным разрешением по сигнатурной декомпозиции и собственному резонансному рассеянию эквивалентных неоднородностей. Предложены численные методы распознавания радиооткликов и синтеза радиоттисков по заданным импульсным характеристикам: методы противовесного дискриминационного импульса, генетических и полюсных функций. Установлено, что передаточная функция облучаемых неоднородностей среды содержит две компоненты: вынужденную – зависящую от таких параметров возбуждающего сверхкороткого импульса (СКИ), как поляризация, профиль распределения поля, направление распространения и т.д., и собственно модовую – связанную с рассеянием СКИ (независящие от волновых параметров СКИ – собственные комплексные резонансные частоты рассеяния). Предложена резонансная модель рассеяния СКИ облучаемой среды, основанная на методе сингулярного разложения в полюсной плоскости. Представлены результаты численного моделирования радиоволновой идентификации объекта по заданной эквивалентной неоднородности и мгновенному радиофизическому состоянию гиромагнитной среды в программе электродинамического моделирования Altair Feko.

Ключевые слова: радиоволновая идентификация, сверхкороткий импульс, нестационарное поле, генетическая функция, полюсная функция, дискриминационный импульс, эквивалентная неоднородность, материальная среда, радиовидение.

Abstract. The radiophysical features of the application of ultrashort pulses of non-stationary configuration in solving radio problems of radio wave identification of parameters of material media are considered. The main reference identifiers have been identified that allow the analysis of radio images of equivalent medium inhomogeneities with subnanosecond resolution using signature decomposition and self-resonant scattering of equivalent inhomogeneities. Numerical methods for recognizing radio responses and synthesizing radio repeats by given impulse characteristics: adaptive damping impulse, genetic and pole functions are proposed. It was found that the transfer function of the irradiated in homogeneities of the medium contains two components: stimulated – dependent on such parameters of the exciting ultrashort pulse (USP) as polarization, field distribution profile, direction of propagation, etc., and the mode itself – USP scattering (independent of wave parameters USP - own complex resonant frequency scattering). A resonance model of the scattering of an USP of an irradiated medium, based on the singular decomposition method on the pole plane, is proposed. The results of numerical simulation of the radio-wave identification of an object based on a given equivalent inhomogeneity and the instantaneous radiophysical state of the gyromagnetic medium are presented.

Key words: radio wave identification, ultrashort pulse, non-stationary field, genetic function, pole function, quenching pulse, equivalent inhomogeneity, material medium, radiovision.

Радиоволновая идентификация представляет собой процесс сравнения принятой реализации радиоотклика СКИ с реперной импульсной характеристикой материальной среды и оценки ее радиофизического состояния [1]. Для этого необходимо формирование базы прямых и сквозных

радиоизображений, в которые заносятся импульсные характеристики эквивалентных неоднородностей различных объектов и структур материальных сред, а также их передаточные функции, резонансные частоты, частоты поглощения и т.д. [2].

Реперные оттиски сквозных и прямых радиоизображений (импульсные характеристики) материальных сред формируются на основе численного моделирования полей, рассеянных неоднородностями этих сред или прошедших через них СКИ, а также из результатов эмпирических исследований [2]. При этом оцененные по результатам обработки полученные данные импульсных характеристик являются сглаженными, так как зондирующий СКИ отличается по своим свойствам от дельта-импульса, позволяющего построить идеализированную импульсную характеристику среды. В этой связи, как было отмечено ранее, спектр СКИ при исследовании эталонных объектов должен быть шире потенциального спектра отражения облучаемой неоднородности.

1. Распознавание радиоизображений по реперным идентификаторам рассеянных СКИ нестационарной конфигурации

Распознавание может осуществляться как по одной, так и по совокупности характеристик в режиме сигнатурной идентификации. В качестве сигнатуры может использоваться, например, набор резонансных частот, характеризующий ряд реперных элементов эквивалентных неоднородностей в структуре материальной среды или структуре облучаемого объекта: при радиоволновой декомпозиции рассматриваются, как правило, линейные по своим электродинамическим свойствам эквивалентные неоднородности. При этом выделяют параметрические и непараметрические математические модели неоднородностей стационарных сред и соответствующие им методы обработки радиоизображений.

При непараметрической радиоволновой идентификации используются отраженные СКИ и их спектры, либо оцениваемые по результатам измерений импульсные характеристики эквивалентных неоднородностей среды. Реперные оттиски в этом случае представляют собой набор отраженных СКИ, их

спектров и сигнатуру импульсных характеристик различных ракурсов. В качестве дискриминационного параметра могут использоваться: обобщенный или дробный коэффициент взаимной корреляции; функционал правдоподобия, представленный оценкой среднеквадратического отклонения; функция минимизации [3,4].

При этом важно отметить, что характеристики антенн и приемопередающих трактов не идентичны, поэтому информацию по эталонным объектам нужно получать для каждой конкретной конфигурации радиоэлектронного устройства идентификации в целом, либо производить поправочные расчеты, используя реперные радиооттиски, сформированные для СКИ с более широкой полосой частот [4]. Поэтому поиск и оптимизация методов радиоволновой идентификации по радиоизображениям в основном направлен на разработку параметрических моделей структурных неоднородностей для СКИ различной частотно-временной конфигурации. Это необходимо для создания автоматизированных систем распознавания и уменьшения временных затрат, что принципиально важно для мгновенного принятия решений при радиоволновой идентификации или регистрации быстро протекающих радиофизических процессов в различных материальных средах [5].

К параметрическим моделям объектов можно отнести совокупность рассеивающих центров неоднородной структуры среды, а также собственное резонансное рассеяние. Причем радиоволновое распознавание для параметрического метода реализуется в том случае, когда реперные радиооттиски определены априорно. В противном случае требуется построение радиоизображений по сигнатуре эквивалентных неоднородностей с последующим анализом, обеспечивающих распознавание и численное преобразование, что достигается посредством метода противовесного дискриминационного импульса и метода генетических функций [4,5]. В основе данного метод лежит резонансная модель рассеяния СКИ на эквивалентных неоднородностях среды, использующая принципы сингулярных разложений.

Действительно, в нестационарных СКИ-откликах, как правило, доминируют осциллирующие колебания, обуславливающие эффект радиоволнового резонансного отражения, которое возникает в тех случаях, когда размеры облучаемой поверхности или ее многопрофильной конфигурации соизмеримы с монохроматическими длинами волн, образующих в финитной суперпозиции СКИ. При этом в ряде случаев резонансное отражение, собственно, обеспечивает связать характеристик радиоволновых откликов с аналитическими свойствами их радиоизображений, используя, например, двустороннее преобразование Лапласа в плоскости комплексных частот [4,5].

Важно отметить, что положения полюсов первого порядка на комплексной плоскости частот зависят только от геометрической конфигурации неоднородной структуры объекта и не зависят от его ракурса, поэтому, определив их, можно получить параметры, характеризующие состояние неоднородной среды при любом возмущении, что важно при решении задачи радиоволновой идентификации.

Так, установлено, что передаточная функция облучаемых неоднородностей среды содержит две компоненты: первая соответствует вынужденной компоненте отклика (зависящие от параметров возбуждающего СКИ – поляризации, формы, направления и т.д.), а вторая – определяется разложением по собственным модам и соответствует собственной компоненте рассеянного СКИ (независящие от волновых параметров СКИ – собственные комплексные резонансные частоты рассеяния) [6]. Использование компонент первого типа позволяет решать задачи селективного определения ракурса неоднородности, в то время как параметры второго типа (комплексно-сопряженные полюса) – идентифицировать геометрическую ее конфигурацию. Поэтому для радиоволновой идентификации объектов в условиях недостаточной априорной информации об их геометрической форме и радиофизических параметров могут быть использованы данные о резонансных частотах рассеяния эквивалентных неоднородностей, представляющих собой реперные идентификаторы.

2. Метод противовесного дискриминационного импульса

Итак, алгоритмически метод заключается в том, что на основе полученных из экспериментальных измерений резонансных частот к радиоволновому отклику объекта или материальной среды в целом подбирается дискриминационный сигнал $d_e(t)$ конечной длительности T_e так, чтобы нейтрализовать все или часть собственных резонансных радиооткликов. Если провести операцию свертки $\chi(t)$ радиоотклика с подобранным к нему импульсом, то результат свертки в период окончания импульса должен стремиться к нулю:

$$\chi(t) = d_e * s(t) = \int_0^{T_e} d_e(\tau) s(t - \tau) d\tau \rightarrow 0, \quad t \geq \tau_e, \quad (1)$$

где τ_e – длительность дискриминационного импульса соответственно, $s(t)$ – СКИ.

Так, при заданной разности дискриминационных параметров 10 дБ вероятность правильного распознавания может достигать 0,9 при отношении сигнал/шум не менее 12 дБ [6]. В дискретном представлении радиоволновой отклик может быть представлена в виде суперпозиции затухающих гармонических колебаний вида

$s(t) = \sum_{i=1}^N a_i \exp(p_i t)$, характеризующихся

расположением полюсов на комплексной плоскости. Здесь $p_i = \alpha_i + j\omega_i$ – резонансные полюса, α_i – коэффициент затухания i -й компоненты, ω_i – резонансная частота, a_i – комплексные вычеты, $0 \leq t \leq \tau_e$. Тогда, как

дискриминационный сигнал может быть представлен в виде

$$d_e(t) = \sum_{n=0}^N E_n \eta(t - n\tau_\eta) = \sum_{n=0}^N E_n \delta(t - n\tau_\eta) * \eta(t), \quad \text{для которого } \eta(t) = 1 \text{ при}$$

$0 \leq t \leq \tau_\eta$ и $\eta(t) = 0$ при $t < 0, t > \tau_\eta$, $\delta(t)$ – дельта-функция, E_n – амплитуды

базисных импульсов в составе дискриминационного импульса, τ_η –

длительность базисного импульса, N – число базисных импульсов.

Подставив выражения для радиоволнового отклика и дискриминационного сигнала в (1) и решив полученное уравнение относительно амплитудных коэффициентов E_n , можно получить требуемые значения амплитуд базисных импульсов. При этом длительность базисных импульсов рекомендуется выбирать кратной периоду самой высокой резонансной частоты в радиоволновом отклике, а длительность дискриминационного импульса в целом – пропорциональной периоду низкочастотной составляющей спектра радиоволнового отклика [4].

Для оценки адекватности свертки используется параметр дискриминационного отношения

$$D = \int_{\tau_e}^{\tau_s} \chi(t)^2 dt / \int_0^{\tau_e} d_e(t)^2 dt, \quad (2)$$

представляющий собой отношение энергии нормированной свертки к энергии нормированного дискриминационного импульса. Так, для дискриминационного импульса, подобранного к радиоволновому отклику, по которому обеспечивается идентификация, $D \rightarrow \min. \times 10^{-8}$

В действительности влияние шумов на собственные резонансные частоты эквивалентных неоднородностей, используемых для построения дискриминационного импульса, препятствуют получению нулевого значения свертки при его подборе из базы данных к исследуемому радиоизображению. Поэтому для оценки различий в значении D для случая регистрации N -неоднородностей целесообразно применять дискриминационное число вида

$$D_N = 10 \lg \left[\frac{D}{D_{\min}} \right], \quad \text{для которого параметр } D_{\min} \text{ получается в условиях}$$

отсутствия помех. Отсюда чем меньше полученное значение D , тем меньше D_N и тем выше вероятность радиоволновой идентификации.

Так, с целью уменьшения влияния шумов при реализации метода предлагается учитывать обе части прямого/сквозного СКИ. Таким образом, для вынужденной компоненты СКИ, которая представляется в виде суммы импульсов, отраженных от локальных рассеивающих центров (прошедших

сквозь них) с соответствующими временными задержками, синтез дискриминационного импульса осуществляется на основе частотного спектра этой части сигнала [4].

Отсюда комбинированный дискриминационный импульс содержит две части: спектральную и временную для двух компонент СКИ. И поскольку синтез дискриминационного импульса зависит от ракурса неоднородности, реперные радиоотклики должны содержать дискриминационные импульсы для различной угловой апертуры.

Синтез дискриминационного импульса осуществляется при помощи построения полинома из базисных импульсов на неперекрывающихся во времени интервалах, неизвестные коэффициенты которого находятся из условий гладкости сигнала и условия равенства нулю результата свертки (1). Так, на рис.1 показаны результаты идентификации сложнопрофильных объектов по локальному набору эквивалентных неоднородностей, а на рис.2 – регистрация мгновенного состояния нестационарного процесса гиромангнитной среды по сверткам дискриминационного импульса с радиооткликом СКИ.

Таким образом, основная идея идентификации при помощи развернутого метода противовесного дискриминационного импульса состоит в том, что свертка такого импульса, подобранного к полюсам эквивалентных неоднородностей, с радиооткликом (1) стремится к нулю для $t \geq \tau_e$, в то время как в иных случаях – является асимптотически ненулевой [6].

Из результатов численного моделирования можно сделать заключение, что развернутый метод, учитывающий обе части прямого/сквозного СКИ, является достаточно эффективным способом идентификации не только конфигураций эквивалентных неоднородностей, составляющих сигнатуру объектов в задачах СКИ радиовидения, но и может быть использован для регистрации мгновенных радиофизических состояний материальных сред. При этом развернутый метод противовесного дискриминационного импульса практически не зависит от динамического ракурса мишени и направления распространения СКИ.

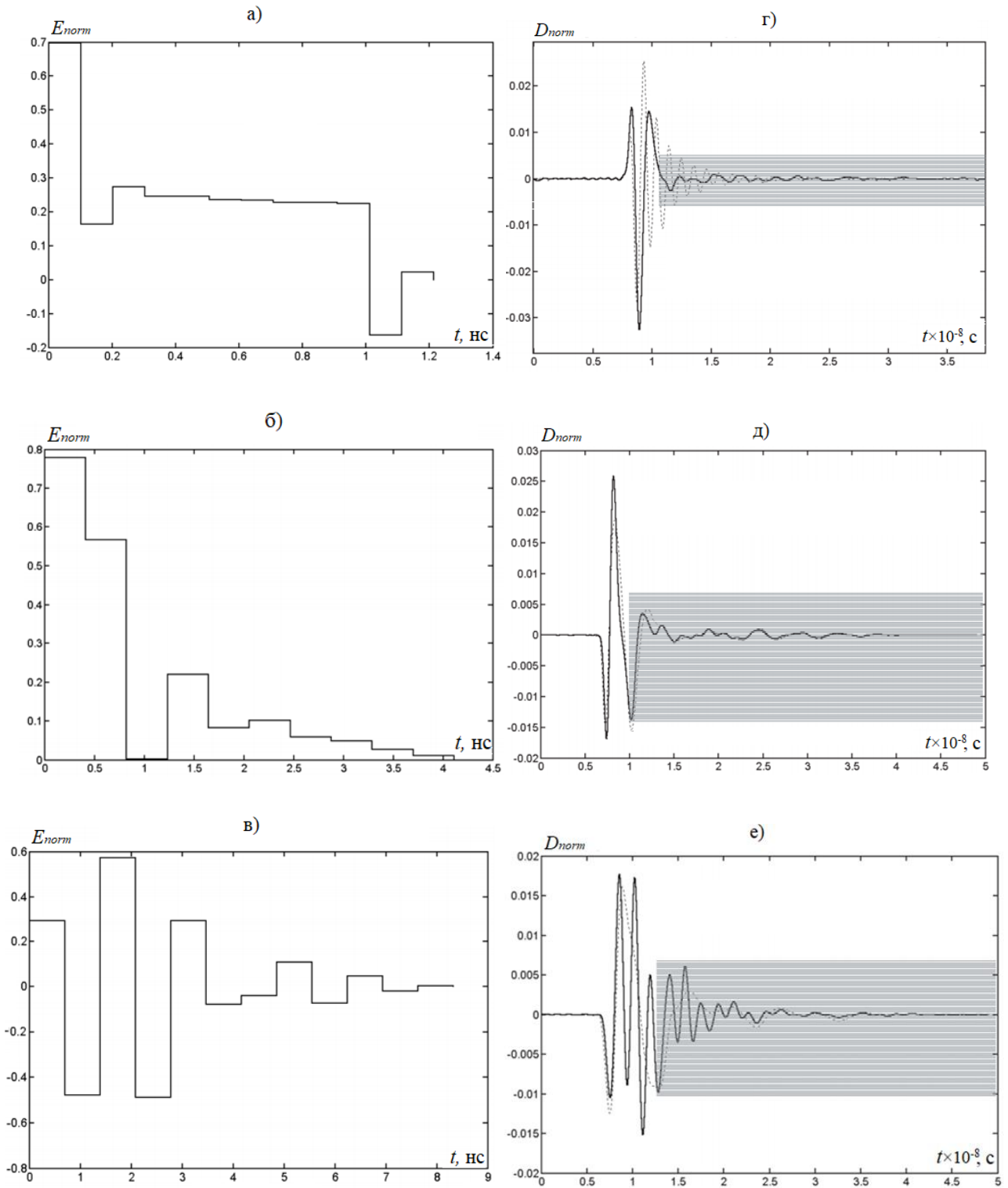


Рис.1. Идентификация объекта по эквивалентным неоднородностям: а), б), в) – приведенные синтезированные дискриминационные импульсы для случая проводящих цилиндра радиусом 0,2 м, сферы радиусом 0,2 м и пластины со сторонами 1 м; г), д), е) – соответствующие приведенные радиоволновые отклики (пунктирные кривые) и свертки дискриминационного импульса с СКИ-откликами (сплошные кривые).

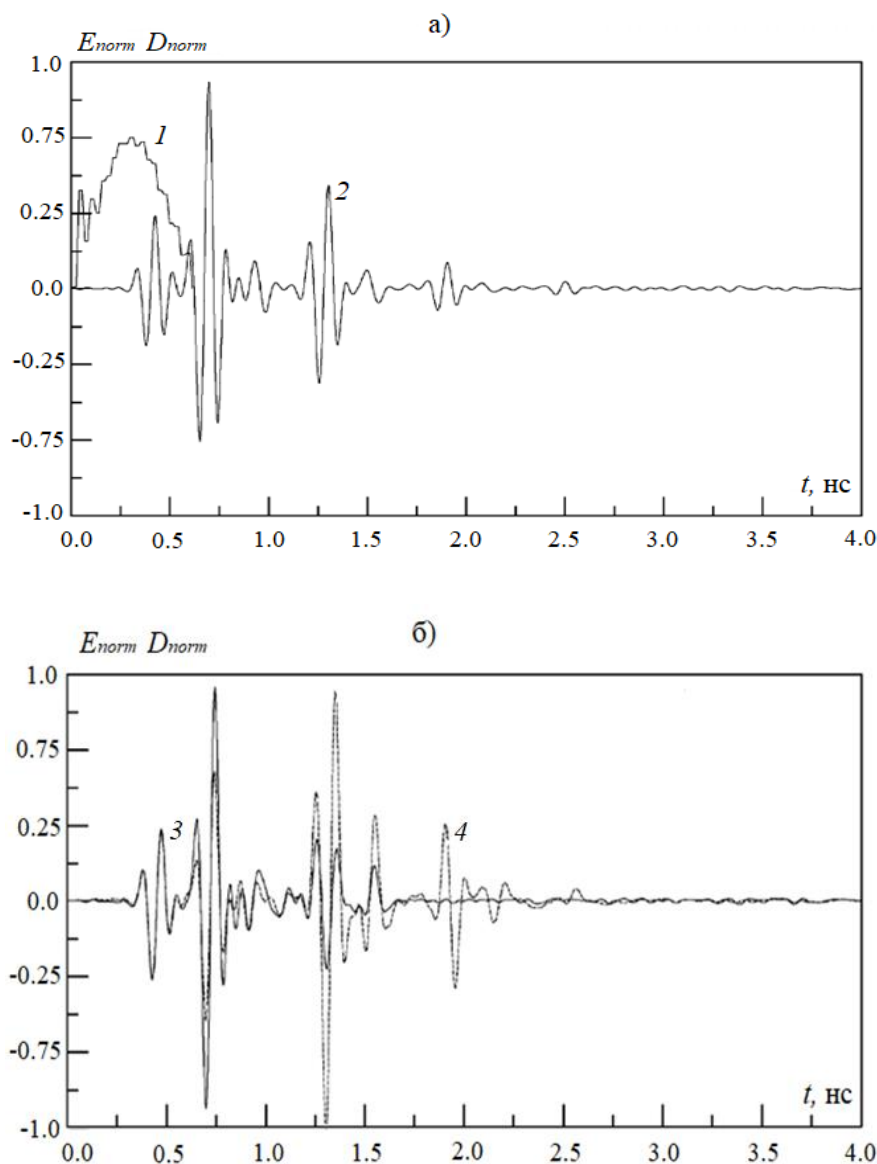


Рис.2. Регистрация мгновенного радиофизического состояния гиромангнитной среды, представленной системой ферритовых стержней, помещенных в магнитное поле: а) – синтезированные дискриминационные импульсы (кривая 1) и профиль отраженного поля СКИ (кривая 2); б) свертки дискриминационного импульса с СКИ-откликами для начального (кривая 3) и конечного (кривая 4) волнового сопротивления гиромангнитной среды.

При этом важно отметить, что высокоточная регистрация финитных полей нестационарной конфигурации является также одной из актуальных задач субнаносекундного радиовидения, практическая реализация которой подробно описаны в работах [8,9].

3. Сингулярная оценка импульсных характеристик неоднородностей стационарных сред на полюсной плоскости

Поскольку информация о зондируемых объектах содержится в импульсных характеристиках, геометрические характеристики эквивалентных неоднородностей необходимо оценить, используя ограниченный массив зарегистрированных СКИ. Вследствие того, что временная длительность импульсной характеристики эквивалентных неоднородностей не может быть больше пространственной протяженности объекта в направлении распространения падающей волны СКИ, отнесенной к скорости распространения волны, оказывается возможным сделать оценку соответствующих геометрических размеров объекта в указанном направлении. Исследуя неоднородности среды под разными углами и получая соответствующие значения оценочной протяженности объекта, можно сделать некоторые выводы о форме и радиофизических параметрах объекта.

Отсюда необходим высокоточный метод, позволяющий по профилю импульсной характеристики делать выводы о геометрической форме объекта. Одним из возможных подходов является метод физической оптики и сингулярной декомпозиции [7]. Так, используя численный метод физической оптики оказывается возможным по принятому СКИ сделать заключение о структуре профиля зондируемого объекта в направлении распространения падающей волны путем двукратного интегрирования импульсной характеристик полученного сигнала радиоотклика. Однако данный метод имеет некоторые ограничения, связанные с использованием приближения Кирхгофа, и не позволяет однозначно определить истинную форму и ориентацию совокупность эквивалентных неоднородностей в пространстве вследствие невозможности получения информации о скрытых в области тени частях объекта. Для восстановления формы объекта представляется полезным использовать данный метод для ряда ракурсов, например, зондируя перемещающийся объект на протяжении некоторого участка его траектории. Информация, полученная в результате такого зондирования, позволяет

восстановить некоторые участки объекта, находившиеся в предыдущих ракурсах в области радиотени.

Более эффективным методом представляется декопозиционный подход прогнозирования характеристик рассеяния объектов сложной конфигурации, суть которого заключается в проведении моделирования обратного отражения СКИ, удовлетворяющего принципу Рэлея, от эквивалентных неоднородностей простейшей формы: плоских (прямоугольная, трапецеидальная, круглая, эллиптическая, треугольная пластины и т.д.) и объемных (конус, пирамида, призма, сфера). Действительно, декопозиционный подход сигнатурной идентификации предполагает проведение анализа динамики изменения импульсной характеристики в широком диапазоне ракурсов, позволяющего выявить основные закономерности их изменений в ограниченной апертуре [5]. Отсюда с учетом выявленных закономерностей синтезируется алгоритм идентификации, связанные с определением максимального числа геометрических параметров простейших эквивалентных неоднородностей и моделируются предельные возможности для различных случаев их обнаружения.

Рассмотрим резонансную модель рассеяния СКИ облучаемой среды, основанную на методе сингулярного разложения – радиоволной декопозиции [6]. Для этого предположим, что на поверхность некоторой неоднородной линейной среды набегают плоский волновой фронт СКИ $s(t)$ заданной нестационарной конфигурации. Отклик среды описывается СКИ-сигналом неизвестной конфигурации $y(t)$, причем в процессе регистрации зафиксирован n -компонентный вектор отсчетов $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ радиоволнового отклика, подверженного шумовым искажениям. Нахождение m -компонентного вектора $S = [s_1, s_2, \dots, s_m]$ сводится к матричному уравнению вида $Y = AS$, где A – матрица размера $n \times m$, характеризующая свойства среды. Так, для произвольной прямоугольной матрицы A размера $n \times m$ всегда существует разложение вида $A = UV$, где U, V – унитарные матрицы; Λ – прямоугольная

диагональная матрица размера $n \times m$ с невозрастающим и неотрицательными элементами на диагонали [6]. Такое разложение называется сингулярным разложением матрицы A . Такая модель рассматриваемой системы содержит параметры зависящие от характера облучаемого СКИ и независящие от его воздействия. Использование параметров первого типа позволяет решать задачи определения ракурса неоднородностей среды, а также селекции геометрически подобных элементов ее неоднородной структуры. В то же время, применение для описания неоднородностей среды параметров второго типа, – собственных комплексных резонансных частот рассеяния, – позволяет существенно уменьшить число используемых признаков радиоволновой идентификации. При этом для распознавания структур стационарных сред в условиях недостаточной априорной информации об их геометрической форме и материале могут быть использованы данные о резонансных частотах рассеяния отдельных эквивалентных неоднородностей, поскольку именно радиофизические свойства сигнатуры неоднородностей, также, как и многопрофильность боковой поверхности объекта можно рассматривать как совокупность связанных отражателей, поглотителей, селекторов и резонаторов [7].

Так, например, например, собственные спектроформанты неоднородностей материальных сред с размерами $0,1 \dots 1$ м, как правило, сосредоточены в резонансной области частот 10 МГц... 1 ГГц [4]. Отсюда, идеальным облучающим СКИ будет радиоимпульс, ФСПМ которого перекроет интересующую область резонансных частот.

Таким образом, задача сингулярного разложения при оценки импульсных характеристик сложных объектов неоднородных сред сводится к нахождению полюсных функций. Действительно, когда СКИ сегментального рассеяния формируются в разные моменты времени, для их аппроксимации целесообразно использовать выражение вида

$$S(\omega) = \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} P_m(\tau) Q_m(\omega) \exp(j\omega\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $P_m(\tau)$ – функция плотности распределения задержек полюсных функций

$$Q_m(\omega) = \frac{C_m^*}{\omega + q_m^*} - \frac{C_m}{\omega - q_m}, \quad q_m = \omega_m + j\gamma_m.$$

Причем каждая полюсная функция $Q_m(\omega)$ с комплексной амплитудой C_m содержит полюс q_m с соответствующими значениями частоты ω_m и декремента аттенюации γ_m . Такое представление позволяет уменьшить число параметров для описания СКИ и повысить устойчивость оценки импульсной характеристики различных объектов и неоднородностей среды. При этом положение полюсов импульсной характеристики на комплексной плоскости и характер функции $P_m(\tau)$ являются идентификационными признаками исследуемого объекта и могут быть эффективно использованы для его декомпозиционного распознавания – апертурного радиотомографического реинжиниринга [4]. Отсюда помимо временного и спектрального представления СКИ также используется и полюсное представление $S(q)$. Полюсная форма предполагает задание множества вещественных функций плотности распределения $\{P_m(\tau)\}$ и множества комплексных значений $\{q_m, C_m\}$, где $m = 1 \dots M$ и допускает однозначное преобразование во временную и частотную форму представления СКИ. Так, обобщенному методу Прони [5] соответствует полюсная модель, для которой $P_m(\tau) = \delta(\tau)$. Причем функции $P_m(\tau)$ подлежат оценке только для случая одновременного включения затухающих колебаний. Отсюда эффективная оценка семейства функций $P_m(\tau)$ реализуется путем их аппроксимации полиномами. В ряде случаев функции $P_m(\tau)$ могут быть выбраны в упрощенном виде – например, путем применения равновероятного распределения начальных моментов включения затухающих колебаний $P_m(\tau)$ в некотором ограниченном интервале времени:

$$\begin{aligned} P_m(\tau) &= 1/T_m, & \tau \in [\tau_m, T_m + \tau_m], \\ P_m(\tau) &= 0, & \tau \notin [\tau_m, T_m + \tau_m]. \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда согласно (2.31) спектр СКИ

$$S(\omega) = \sum_{m=1}^M Q_m(\omega) \exp[j\omega\tau_m] (\exp[j\omega T_m] - 1) / j\omega T_m. \quad (5)$$

Таким образом, определение импульсных характеристик облучаемых неоднородностей среды состоит в следующем. Для известной последовательности временных отчетов СКИ синтезируется полюсная модель $\tilde{S}(q)$, отвечающая требованиям функции минимизации вида

$$F_{\min}^s = \sum_{i=1}^N |s(t_i) - \tilde{s}(t_i)|^2 / \sum_{i=1}^N |s(t_i)|^2, \quad (6)$$

где $\tilde{s}(t_i)$ – временное представление полюсной модели $\tilde{S}(q)$. Причем значения переменных функции $\tilde{S}(q)$, отвечающих условию $F_{\min}^s \rightarrow \min$, находятся при помощи алгоритма покоординатного спуска, а соответствующие полюсам значения комплексных амплитуд C_m – из решения системы уравнений. Далее из известной последовательности временных отчетов рассеянного СКИ определяется полюсная модель импульсной характеристики $\tilde{H}(q)$, отвечающая требованиям функции минимизации вида

$$F_{\min}^y = \sum_{i=1}^M |y(t_i) - \tilde{y}(t_i)|^2 / \sum_{i=1}^M |y(t_i)|^2, \quad (7)$$

где $\tilde{y}(t_i)$ – временное представление рассеянного эквивалентными неоднородностями среды СКИ, полученное вычислением интеграла Фурье на основе теоремы о вычетах для $\tilde{Y}(\omega) = \tilde{H}(\omega)\tilde{S}(\omega)$. Поиск параметров $\tilde{H}(q)$ проводится по аналогии с нахождением параметров модели $\tilde{S}(q)$, однако с некоторыми отличиями: в выражении для $\tilde{Y}(\omega)$ переменные параметры – фиксированы и оценке подлежат параметры $\tilde{H}(\omega)$. Причем выражение для модельных $\tilde{s}(t)$ и $\tilde{h}(t)$ может быть представлено как

$$u(t) = \sum_{m=1}^M \int_0^t P_m(t-\tau) \left[C_m \exp(jq_m \tau) - C_m^* \exp(jq_m^* \tau) \right] d\tau. \quad (8)$$

Таким образом, соответствующая модель функции радиоволнового отклика может быть найдена в результате свертки $\tilde{y}(t) = \tilde{h}(t) \otimes \tilde{s}(t)$, а в качестве точностного критерия воспроизводимости импульсной характеристики используется условие минимизации целевой функции (7). При этом для описания модели СКИ ищется минимальное число полюсов, обеспечивающее пороговое значение правдоподобия распознавания, задаваемое уровнем шумов в рассеянном СКИ. Для априорно неизвестного отношения сигнал/шум, число полюсов N_p определяется из условия

$$\left[F_{\min}^y(N_p) - F_{\min}^y(N_p + 1) \right] \ll \left[F_{\min}^y(N_p - 1) - F_{\min}^y(N_p) \right].$$

Отсюда оценка импульсных характеристик будет определяться смещениями в оценках полюсов, а также доверительными интервалами, получаемыми из результатов статистического моделирования [6].

Заключение

Идентификация радиоизображений неоднородностей и мгновенных радиофизических состояний материальных сред относится к задачам радиоволнового реинжиниринга и наиболее полное представление об объекте или нестационарном радиофизическом состоянии среды при создании реперных радиоизображений позволяет получить в режиме радиотомографической регистрации в режиме радиоволновой сингуляризации. Реализация такого режима достигается путем применения численных методов распознавания радиооткликов и синтеза радиоттисков по заданным импульсным характеристикам: методы противовесного дискриминационного импульса, генетических и полюсных функций. Так, синтез генетических или дискриминационных функций, как временных образов сигнатурных фрагментов объекта или мгновенных радиофизических состояний материальных сред, заключается в следующем: сложнопрофильный объект представляется как сумма фрагментов, т.е. элементарных эквивалентных

неоднородностей, образующих боковую поверхность; для каждого отдельного фрагмента рассчитываются рассеянный/сквозной СКИ заданной конфигурации при различных угловых апертурах и ракурсах; создается база данных генетических функций с выбранным шагом угловой дискретизации (набор таких функций разбивается на классы, соответствующие характерным сигнатурам объекта и содержащие только их вариации); СКИ, отраженный от сложного объекта при известных углах его положения, представляется в виде суперпозиции генетических функций. В тоже время задача сингулярного разложения при оценки импульсных характеристик сложных объектов неоднородных сред сводится к нахождению полюсных функций.

Таким образом, если облучаемая неоднородная среда или многопрофильный объект имеют различную геометрическую форму и/или локально выраженные радиофизические свойства – представляют собой, например, композитную структуру, то они имеют различные передаточные функции, представленные системой импульсных характеристик. Отсюда, согласно методу сингулярного разложения, импульсные характеристики материальной среды или объекта полностью характеризуются набором собственных резонансных частот на некоторой плюсовой плоскости. При этом важно отметить, что в качестве дополнительного критерия оценки импульсной характеристики эквивалентных неоднородностей в структуре облучаемой среды также может служить решение обратной задачи – восстановление облучающего СКИ по установленной импульсной характеристике и рассеянному СКИ, а предложенный развернутый метод дискриминационного импульса, учитывающий обе части прямого/сквозного СКИ, является достаточно эффективным способом идентификации не только конфигураций эквивалентных неоднородностей, составляющих сигнатуру объектов в задачах СКИ радиовидения, но и может быть использован для параметрической регистрации радиофизических параметров материальных сред.

Литература

1. Костин М.С. Формонеустойчивая электродинамика распределения электрических полей субнаносекундных сигналов в неоднородных средах // Российский технологический журнал. 2017. – № 4 (18). Т.5. – с. 32-46.
2. M.S. Kostin, V.M. Vikulov, S.S. Tambovskii. Form-Temporal Dynamics of Subnanosecond Radio Pulses Propagating in Heterogeneous Media // Journal of Communications Technology and Electronics. 2019 – No.2, Vol.64. – pp. 100-106.
3. Будагян И.Ф., Костин М.С. Численные методы обработки сверхкороткоимпульсных сигналов радиосенсорных систем // Радиоэлектронная техника. 2015. – №1(7). – с. 104-109.
4. Костин М.С., Воруничев Д.С. Радиоволновые процессы и технологии: учебное пособие / М.С. Костин, Д.С. Воруничев. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. – 296 с.
5. Будагян И.Ф., Щучкин Г.Г. Волновые процессы в материальных средах – Саарбрюккен.: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 200 с.
6. Костин М.С. Субнаносекундные сигналы и технологии: учебное пособие / М. С. Костин. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2018. – 110 с.
7. M.S. Kostin, K.A. Boikov, A.F. Kotov. High-Accuracy Methods for Cyclic-Like Aclock Digitization of Subnanosecond Signals // Journal of Communications Technology and Electronics. 2019 – No.2, Vol.64. – pp. 168-171.
8. Будагян И.Ф., Костин М.С. Атактовая оцифровка сверхкоротких импульсов в гибридных системах радиофотонного сканирования // Журнал радиоэлектроники. [электронный журнал]. 2016. – №3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar16/5/text.html> (дата обращения: 01.07.2019).
9. Бойков К.А., Костин М.С. Моделирование и исследование динамических характеристик системы радиоимпульсной регенерации // Журнал

радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. – №6. – URL:
<http://jre.cplire.ru/jre/jun18/7/text.pdf> (дата обращения: 01.07.2019).

Для цитирования:

М.С.Костин, П.В.Севрюгин, И.А.Стешин. Методы сверхкороткоимпульсной идентификации параметров материальных сред по конфигурации нестационарных полей в радиовидении. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/5/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.5