

Способ относительного диагностирования свойств недоступного объекта по фазовым параметрам рассеянного поля

В.А. Никонов

Омский государственный технический университет, 644050, Омск, пр. Мира, 11, E-mail: bazil83@mail.ru

Представлен способ, алгоритм и методика оценки параметров недоступного объекта с использованием выявленных информативных характеристик отражённого импульсного сигнала. In the work we introduce a method, algorithm and evaluation procedure that utilize detected informative characteristics of echo pulse signal to evaluate parameters of inaccessible object.

В настоящее время сверхширокополосная радиолокационная интроскопия используется для обнаружения, идентификации, определения местоположения и классификации объектов и отражающих слоёв, находящихся в диэлектрическом слое с выраженными затуханием и дисперсией [1]. Одной из задач пространственно-временной обработки локационных данных является рациональное использование информативных параметров отражённого сигнала, позволяющее не только сформировать изображение среды, но и проводить оценку характеристик объектов.

Отечественные и зарубежные работы в области подповерхностного зондирования направлены на решение прямых и обратных задач, обработку сигналов и их интерпретацию. Несмотря на имеющиеся достижения, не обеспечивается удовлетворительная погрешность, как в определении геометрии объекта, так и в оценке его электрофизических параметров.

В рамках решения существующих проблем необходима разработка новых методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения обратных задач при реконструкции и оценке значений геометрических и электрофизических характеристик сред и объектов по результатам сверхширокополосного (СШП) зондирования. Простая связь между прямыми и отражёнными полями для идеально проводящего тела получается при использовании приближений физической оптики, отражающих связь между током на «освещённой» поверхности идеально проводящего тела и напряжённостью магнитного поля падающей волны [2].

Но такой подход приводит к простым алгоритмам для тел, обладающих осью симметрии и облучаемых вдоль этой оси. Для тел, у которых ось симметрии отсутствует, алгоритмы восстановления существенно усложняются [3]. Эти выводы справедливы, если объект является идеально проводящим телом. Выражения для токов, возбуждаемых падающей электромагнитной волной и возбуждающих рассеянное поле, позволяют вычислить его характеристики в произвольной точке пространства. Методика получения выражений для токов показана в [4]. Но следует отметить, что использование граничных условий для магнитного или электрического поля даёт интегральное уравнение. Его численное решение при граничных условиях для магнитного поля может быть выполнено только для замкнутых проводящих тел (нельзя использовать для тонких незамкнутых поверхностей и тонких проводников). Граничные условия для электрического поля обеспечивают решение, применимое для объектов с нулевой толщиной, тонких проводов и тонких незамкнутых поверхностей.

Выражение для поверхностных токов на замкнутой проводящей поверхности даёт решение интегрального уравнения для магнитного поля [4], в котором имеется слагаемое, отражающее влияние токов в других точках поверхности на ток в точке наблюдения. Поскольку влияние других токов на ток в точке запаздывает на время R/c (R – отклонения радиус-вектора точки наблюдения от радиус-вектора текущей точки интегри-

рования), это позволяет утверждать о влиянии на фазу отражённого сигнала, как формы, так и физико-химических свойств объекта. Степень этого влияния можно попытаться определить по оценке изменений в компонентах отражённого сигнала относительно падающего сигнала. Взаимодействие излучения с веществом сводится к совокупности процессов рассеяния, поглощения и генерации электромагнитного излучения [5]. Тогда при импульсном зондировании спектр падающего сигнала изменится, так как некоторая полоса частот в его спектре при прохождении через слой вещества ослабится из-за поглощения и рассеяния.

Взаимодействие волны с рассеивающей или поглощающей частицей характеризуется соотношением вероятности взаимодействия на единице пути к концентрации частиц, с которыми происходит взаимодействие. Следовательно, такое взаимодействие, при котором волна и частица из фиксированных начальных состояний переходят в определённые конечные состояния, носит вероятностный характер. Поэтому, при оценке характеристик исследуемого объекта по изменениям в спектре отражённого сигнала, их нужно искать в реакции на некоторое приращение в параметрах облучающего сигнала (например, внесённый фазовый сдвиг), в том числе и в описательной статистике составляющих спектра.

Поэтому предлагается использовать свойство чувствительности спектра отражаемого широкополосного зондирующего импульсного сигнала к воздействию со стороны объекта зондирования. Наиболее информативным является анализ начальных фаз аргумента частотного спектра (фазового спектра) вследствие наличия функции с большой крутизной изменения (функции арктангенса) в выражении для текущего спектра:

$$\Psi(\omega) = -\arctg[S(\omega)_{\sin}/S(\omega)_{\cos}].$$

Напряжённость электромагнитного поля, создаваемого в точке наблюдения отражённой волной, зависит от числа зон Френеля, одновременно участвующих в создании отражённой волны. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, поле в некоторой точке пространства является результатом интерференции вторичных источников. Амплитуда результирующего колебания в точке наблюдения будет определяться вкладом всех зон. Но если зондирование происходит периодической последовательностью импульсов с большой частотой (период и длина волны стремятся к нулю) и с малой длительностью фронта (имеющим очень широкий спектр – большое, стремящееся к бесконечности число гармоник), то размер зоны Френеля стремится к нулю и амплитуда поля в точке наблюдения будет изменяться при малейшем изменении размеров и формы объекта. В этом случае любое изменение геометрических размеров обязательно отражается на амплитуде и фазе гармоник (особенно высших) импульсного зондирующего сигнала.

Изменение или конкретное состояние физико-химических свойств объекта также проявится в амплитудных и фазовых параметрах составляющих отражённого импульсного зондирующего сигнала [6]. Таким образом, учитывая известное положение в представлении спектра периодической (с периодом T) последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой E и длительностью τ рядом Фурье, амплитуда n -ой гармоники определяется по известному соотношению:

$$A_n = \frac{2E}{\pi n} \left| \sin \frac{n2\pi\tau}{2T} \right|, \quad (1)$$

и при $\frac{\tau}{T} \rightarrow 0$, когда $\sin x \rightarrow x$, получим:

$$A_n = \frac{2E}{\pi n} \cdot \frac{n\pi\tau}{T} = 2E \frac{\tau}{T}. \quad (2)$$

То есть, амплитуды всех гармоник становятся одинаковыми, спектр становится равномерным, и информативный вклад высших гармоник в представление характери-

стик объекта резко возрастает. Установив зависимость фазы гармоники отражённого сигнала от параметров объекта и его материала, можно оценить значение коэффициента влияния характеристик объекта на параметры гармоник. Поэтому можно предложить следующий алгоритм определения интегральной импульсной характеристики зондируемой среды, состоящий из двух этапов (рис. 1).

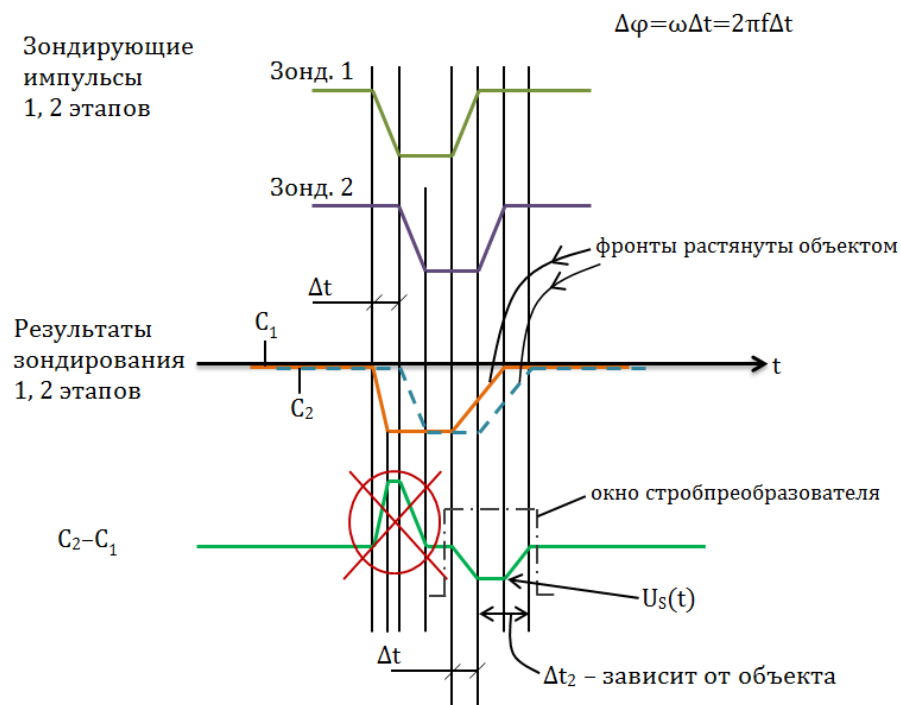


Рис. 1. Способ относительного диагностирования.

Первый этап:

- а) формируется импульсный СШП сигнал с регулируемыми параметрами;
- б) амплитуда и фаза n -й гармоники импульсного сигнала с установленными параметрами фиксируется в радаре. Указанные параметры сформированного сигнала могут быть рассчитаны без привлечения средств измерений;
- в) среда зондируется импульсом с установленными параметрами;
- д) рассеянный зондируемой средой сигнал фиксируется методом стробирования, и запомненные дискретные значения сигнала подвергаются аналого-цифровому преобразованию и запоминаются;
- е) по запомненным цифровым отсчётам проводится расчёт амплитуды и фазы n -й гармоники рассеянного сигнала.

Второй этап:

- ж) формируется импульсный СШП сигнал с регулируемыми параметрами, сдвинутый во времени относительно импульса в первом этапе на интервал времени Δt ;
- и) по полученным изменениям амплитуды и фазы n -й гармоники принятого сигнала оценивается интегральная импульсная характеристика зондируемой среды. Среда вносит изменения в параметры рассеянного сигнала относительно излучённого, что ведёт к проявлению её импульсной характеристики в указанных изменениях. Это следует из содержательного определения термина «импульсная характеристика».

Параметры зондирующего сигнала задаются в формирователе импульсов радара. Меняя временной сдвиг, можно подробно исследовать обнаруженный объект. Так как оценка импульсной характеристики среды проводится по изменениям параметров высших гармоник, то необходимо задавать значение $\Delta\varphi$ на стороне излучателя в диапазоне

десятих–сотых долей градуса.

Анализ результатов теоретических исследований и практических разработок в области задания фазового сдвига подтверждают возможность решения поставленных задач путём применения систем фазовой автоподстройки частоты: так при тактовой частоте 1 ГГц практически задаётся фазовый сдвиг с погрешностью не более $0,1^{\circ}$, то есть временной сдвиг задаётся с погрешностью не более 280 фс [7].

При использовании в фазозадающих устройствах колец ФАПЧ с преобразованием частоты (для задания фазового сдвига на более высоких частотах) возникает вопрос минимизации уровня погрешности за счёт флуктуационных и комбинационных составляющих. При проведении параметрической оптимизации широкополосных систем ФАПЧ с привлечением рекомендаций из [8], оптимальный выбор работы смесителя и применение специализированных интегральных схем (двубалансных) позволяет получить уровень побочных составляющих в спектре выходного сигнала преобразователя не более минус 60 дБ.

Таким образом, предложенный алгоритм оценки интегральной импульсной характеристики зондируемой среды позволяет выявить влияние зондируемого объекта на отражённый импульсный сигнал. Это влияние наиболее существенно проявляется в параметрах высших гармоник амплитудного и фазового спектра и может быть использовано при построении систем оценки параметров недоступных объектов.

Возможны случаи, когда одновременное измерение АЧХ и ФЧХ информативного параметра объекта затруднено. Это будет наблюдаться, когда в диапазоне частот АЧХ информативного параметра изменяется незначительно, в то время как его ФЧХ изменяется существенно. Также сложно наблюдать АЧХ при малых мощностях зондирующего излучения: АЧХ искажается шумом, а ФЧХ измеряется более точно за счёт селективного усиления отдельных спектральных составляющих до уровней, достаточных для фазового детектирования.

Приведённый материал также подтверждает возможность практической реализации высказанных теоретических положений.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
2. Боровков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. – М.: Связь, 1978. – 189 с.
3. Joung J.D. Target imaging multiple frequency radar returns. – IEEE Trans., 1976, v. AP-24, №3, p.p. 276–278.
4. Bennett C.L., DeLorenzo J.D. Short pulse response of radar targets. – Antennas and Propagation Society International Symposium. – Dec., 1969. – Vol. 7, p.p. 124–130.
5. Митрофанов И.Г. Взаимодействие излучения с веществом / [Электронный ресурс] <http://www.astronet.ru/db/msg/1190793>. – Загл. с экрана. – Яз.рус.
6. Никонов А.В., Никонов В.А. Информативность фазовой компоненты электромагнитной волны при контроле и диагностировании свойств объектов // Системы управления и информационные технологии. – № 2 (40). – 2010. – С. 86–91.
7. Жилин Н.С., Никонов А.В., Никонова Г.В., Сайфутдинов К.Р. Генераторный канал АИС на основе фазовых методов с пикосекундным разрешением // Межвузовский сборник «Цифровые радиотехн. сист. и приборы» / Красноярский ГТУ. – 1996. – С. 151–156.
8. Глинченко А.С. Методы синтеза и измерения параметров гармонических сигналов в режиме когерентной выборки // Труды МНТК «Спутниковые системы связи и навигации». – Красноярск, 1997. – Т. 3. – С. 304–310.