

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА

А.В. Музыченко, А.З. Сазонов, О.И. Сухаревский

(¹Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил,
²Завод агрегатных станков, Харьков)

Обосновывается возможность и предлагается алгоритм определения геометрических параметров подповерхностного проводящего трубопровода по результатам измерения в дальней зоне характеристик рассеяния. Алгоритм основан на асимптотических соотношениях, описывающих электромагнитное поле, рассеянное идеально проводящей и импедансной моделью такого объекта.

трубопровод, импедансная модель, радиолокационное зондирование

Постановка проблемы. Одним из актуальных приложений подповерхностной радиолокации является зондирование трубопроводов, находящихся в грунте, с целью их обнаружения, определения местоположения, ориентации и параметров. Такая необходимость возникает, в частности, при обнаружении и прослеживании подземных коммуникаций, например, газо-, нефтепроводов, кабелей, тепло- и водопроводных трасс.

В ряде случаев зондирование объектов упомянутых типов может осуществляться радиолокатором, расположенным на воздушном носителе. Так, в работе [1] обсуждаются результаты дистанционного зондирования подземных трубопроводов с применением самолетной радиолокационной системы "МАРС", смонтированной на борту самолета ИЛ-18. В состав данной системы входят радиолокаторы бокового обзора с реальной и синтезированной апертурами. Особенностью использования таких систем является то, что в данном случае источник зондирующей волны находится на значительной высоте, вследствие чего на поверхность грунта будет падать электромагнитная волна (ЭМВ), имеющая плоский фронт. При этом длина волны радиолокатора много меньше радиуса зондируемого трубопровода.

Анализ последних достижений и публикаций. Данная задача рассматривается, в частности, в работе [2], которая посвящена разработке метода определения геометрии цилиндрического объекта (размер которого одного порядка с длиной зондирующей волны), погруженного в однородную или слоистую среду. Метод основан на решении прямой задачи для такого объекта с помощью метода интегральных уравнений. В работе [3] предлагается применение для определения геометрических параметров подповерхностного цилиндрического рассеивателя голографических методов или методов вос-

становления по проекциям. Разработанные здесь алгоритмы обработки радиолокационных данных обладают высокой пространственной разрешающей способностью, однако их применение возможно при наличии информации о рассеивающих свойствах неизвестного объекта для многих ракурсов и частот зондирования. Данная особенность может повлечь за собой значительное усложнение радиолокационной системы, предназначенной для определения параметров объекта (либо его идентификации) и способов ее применения. Следует отметить, что все приведенные выше методы определения параметров подповерхностных рассеивателей разработаны и устойчиво работают в резонансном диапазоне частот зондирования. В то же время для существенной части спектра частот, используемых в подповерхностной радиолокации (десятки – сотни МГц) подповерхностные объекты рассматриваемого типа будут иметь большие электрические размеры.

Формулирование цели статьи. Целью статьи является обоснование возможности определения параметров подземного трубопровода по результатам радиолокационного зондирования.

Изложение основного материала. В работах [4, 5] рассматривается решение прямой задачи рассеяния, соответствующей описанной ситуации – выводятся математические соотношения, описывающие электромагнитное поле, рассеянное моделью подземного трубопровода, наблюдаемое в точке, находящейся в дальней зоне, при падении на границу раздела "воздух – грунт" плоской ЭМВ. В статье [4] в качестве модели рассматривается бесконечный идеально проводящий круговой цилиндр, в работе [5] данная модель уточняется путем учета влияния конечности величины проводимости металла, из которого выполнен трубопровод. В результате получены достаточно простые, имеющие ясный физический смысл, асимптотические формулы, связывающие искомое поле с такими параметрами задачи как радиус кривизны поверхности рассеивателя в точке зеркального отражения и его ориентация. Формулы (1, а), (1,б) соответствуют идеально проводящей модели, а формулы (2, а), (2, б) – импедансной модели подземного трубопровода. В обоих случаях формулы (а) соответствуют Е-поляризации (вектор электрической напряженности поля зондирующей волны параллелен оси объекта), (б) – Н-поляризации зондирующей волны (вектор магнитной напряженности поля зондирующей волны параллелен оси объекта):

$$u_{\text{пасс}}(\vec{\psi}) = -\frac{e^{ik_1(y_0+d)} e^{i2k_2d}}{\sqrt{y_0+d}} \frac{e^{i2k_2d}}{k_1+k_2} \sqrt{2k_1k_2R} \times \left(1 + \frac{5i}{16k_2R} - \frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} \sqrt{\frac{R}{R+4d}} e^{i2k_2d} \left(1 - \frac{3i}{16k_2R} - \frac{i}{4k_2(R+4d)}\right)\right); \quad (1, a)$$

$$u_{\text{pacc}}(\vec{\psi}) = \frac{e^{ik_1(y_0+d)}}{\sqrt{y_0+d}} \frac{e^{i2k_2d}}{k_1+k_2} \sqrt{2k_1k_2R} p \times \left(1 + \frac{5i}{16k_2R} + \frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} \sqrt{\frac{R}{R+4d}} e^{i2k_2d} \left(1 - \frac{3i}{16k_2R} - \frac{i}{4k_2(R+4d)} \right) \right); \quad (1,6)$$

$$u_{\text{pacc}}(\vec{\psi}) = -\frac{e^{ik_1(y_0+d)}}{\sqrt{y_0+d}} \frac{e^{i2k_2d}}{k_1+k_2} \sqrt{2k_1k_2R} p \left(1 - \alpha + i \frac{5-13\alpha}{16k_2R} - (1-2\alpha) \frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} \sqrt{\frac{R}{R+4d}} e^{i2k_2d} \left(1 - \frac{3i}{16k_2R} - \frac{i}{4k_2(R+4d)} \right) \right); \quad (2, a)$$

$$u_{\text{pacc}}(\vec{\psi}) = \frac{e^{ik_1(y_0+d)}}{\sqrt{y_0+d}} \frac{e^{i2k_2d}}{k_1+k_2} \sqrt{2k_1k_2R} p \left(1 + i \frac{5-8\alpha}{16k_2R} + \frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} \sqrt{\frac{R}{R+4d}} e^{i2k_2d} \left(1 - \frac{3i}{16k_2R} - \frac{i}{4k_2(R+4d)} \right) \right), \quad (2, б)$$

где u_{pacc} – функция, описывающая соответствующую компоненту рассеянного объектом поля; $\vec{\psi}$ – радиус-вектор точки наблюдения, имеющей координаты (x_0, y_0) ; d – глубина на которой находится рассеиватель (расстояние от верхней точки поверхности объекта до границы раздела "воздух – грунт"); k_1 – волновое число свободного пространства; k_2 – волновое число среды, в которой находится трубопровод; R – его радиус; p – коэффициент прохождения ЭМВ в грунт; α – величина, характеризующая интенсивность отражения ЭМВ от объекта, определяется соотношением

$$\alpha = W / W_2, \quad (3)$$

где $W = \frac{1-i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega\mu}{4\pi\sigma}}$, $W_2 = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}$ – импеданс металла, из которого выполнен рассеиватель и волновое сопротивление грунта, характеризующегося проницаемостями ε_2 , μ_2 .

Следует отметить, что формулы (1), (2) соответствуют случаю нормального падения ЭМВ на границу раздела "воздух – грунт", при этом точка наблюдения находится над центром поперечного сечения рассеивателя. В данной ситуации коэффициент p определяется следующей формулой:

$$p = \frac{2W_2}{W_1 + W_2},$$

где $W_1 = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Из соотношений (1), (2) видно, что рассеянное поле в точке наблюдения явным образом зависит от параметров рассевателя – радиуса R и, в случае использования импедансной модели, проводимости σ его материала. На основании этого можно попытаться разработать алгоритм определения геометрических параметров обнаруженного подземного трубопровода по результатам измерения в дальней зоне его характеристики рассеяния.

Результаты моделирования с использованием данных формул показывают наличие разницы в модулях рассеянных полей при зондировании на двух ортогональных поляризациях. При некоторых условиях величина такого поляризационного контраста может достигать десятков процентов. Это дает возможность использовать радиолокационные измерения на двух ортогональных поляризациях для определения ориентации зондируемого трубопровода.

Рассмотрим вначале использование для решения данной задачи идеально проводящей модели рассевателя. Предположим, что в точке $\bar{\psi}$ расположена антенная система совмещенной РЛС. При сделанных ранее предположениях она находится на большом расстоянии от поверхности земли (например, размещена на борту летательного аппарата). Допустим, что тем или иным способом установлено местонахождение подземного трубопровода. Требуется определить его геометрические параметры и ориентацию. Для этого достаточно провести зондирование на двух ортогональных поляризациях, направления которых характеризуются ортами \bar{u}_1^0 и \bar{u}_2^0 . В точке приема производится измерение характеристик рассеянного поля на тех же поляризациях, в результате чего определяются амплитуды напряженности полей \bar{u}_1 и \bar{u}_2 . Пусть, для определенности, ось трубопровода составляет угол φ с направлением поляризации \bar{u}_1 . Обозначим через \bar{u}_{\parallel} и \bar{u}_{\perp} векторы напряженности рассеянного поля, соответствующие ситуации, когда вектор поляризации, соответственно, параллелен и перпендикулярен оси объекта. Тогда можем записать:

$$|\bar{u}_1|^2 = |\bar{u}_{\parallel}|^2 \cos^2 \varphi + |\bar{u}_{\perp}|^2 \sin^2 \varphi; \quad |\bar{u}_2|^2 = |\bar{u}_{\parallel}|^2 \sin^2 \varphi + |\bar{u}_{\perp}|^2 \cos^2 \varphi,$$

откуда
$$|\bar{u}_1|^2 + |\bar{u}_2|^2 = |\bar{u}_{\parallel}|^2 + |\bar{u}_{\perp}|^2; \quad (4)$$

$$|\bar{u}_1|^2 - |\bar{u}_2|^2 = \left(|\bar{u}_{\parallel}|^2 - |\bar{u}_{\perp}|^2 \right) \cos 2\varphi. \quad (5)$$

Левые части обоих выражений являются результатами измерения и, следовательно, известны. Правые части представляют собой функции искомых параметров, аналитический вид которых известен (формулы (1),

(2)). При этом в уравнение (4) не входит угол ориентации. Дальнейшие шаги алгоритма зависят от наличия и состава априорной информации.

В случае, когда известна глубина погружения (например, измерена предварительно), из уравнения (4) можно определить радиус поверхности трубопровода, после чего из уравнения (5) определяется ориентация его оси.

Учитывая, что исходные соотношения, описывающие рассеянное трубопроводом ЭМП получены в предположении зондирования плоской монохроматической волной, для практической реализации описанного алгоритма целесообразно использовать длинные одночастотные зондирующие сигналы. Отметим, что проведение измерения для еще хотя бы одной частоты зондирования дает дополнительную информацию, обеспечивающую решение задачи определения параметров рассматриваемого рассеивателя при отсутствии данных о глубине его погружения.

Следует также отметить, что для применения описанного алгоритма необходимо располагать априорной информацией об электрических параметрах почвы, в которой находится рассеиватель, поскольку данные величины входят в исходные соотношения, на основе которых строится предлагаемый алгоритм. Такая информация может быть получена из цифровых карт местности, либо по данным непосредственного радиолокационного измерения коэффициента отражения ЭМВ от границы раздела "воздух – грунт".

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено математическое моделирование его функционирования при следующих условиях: цилиндр радиуса $R = 0,5$ м находится на глубине $d = 0,25$ м в каштановом суглинке с плотностью $w = 1,4$ г/см³ и влажностью $\rho = 10\%$; частота зондирующей волны 100 МГц.

В случае, когда электрические параметры грунта точно известны, погрешность δ_R определения радиуса цилиндра R не превысила 1%.

Далее была рассмотрена ситуация, когда априорная информация об электрических параметрах среды и о глубине погружения рассеивателя содержит погрешность $\delta_{гр}$. В данном случае были получены следующие результаты: при $\delta_{гр} = 5\%$ $\delta_R \approx 9\%$; при $\delta_{гр} = 10\%$ $\delta_R \approx 18\%$; при $\delta_{гр} = 15\%$ $\delta_R \approx 28\%$.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности использования предложенного алгоритма для определения геометрических параметров находящихся в грунте металлических трубопроводов.

При наличии информации о материале, из которого выполнен подповерхностный цилиндрический объект, для определения его геометрических параметров может быть использована импедансная модель рассеивателя, построенная на основании соотношений (2, а, б).

Кроме этого, была предпринята попытка определения наряду с геометрическими параметрами рассеивателя еще и значения проводимости материала, из которого он выполнен. Однако удовлетворительные значения погрешности результатов в этом случае были получены только при достаточно точных (до единиц процентов) априорных данных об электрических параметрах грунта, в котором находится объект. Это объясняется сильной зависимостью величины параметра α (формула (3)), посредством которого проводимость σ входит в соотношения для рассеянного поля, от значения волнового сопротивления среды, в которой находится рассеиватель. На практике достижение такой точности априорных данных о параметрах грунта затруднительно, поэтому предполагается использование импедансной модели рассеивателя для повышения точности определения геометрических параметров и глубины погружения объекта в случае, когда известно из какого металла он выполнен.

Выводы. Таким образом, в данной статье обосновывается возможность и предлагается алгоритм определения геометрических параметров подземного металлического (импедансного) трубопровода по результатам радиолокационного зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калмыков А.И., Фукс И.М. О контрастах радиолокационных отражений при подповерхностном дистанционном зондировании // *Доповіді Національної Академії Наук України*. – 1995. – № 2. – С. 65 – 68.
2. Chommelux L., Pichot C. Bolomey J. *Electromagnetic Modeling for Microwave Imaging of Cylindrical Buried Inhomogeneities* // *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. – 1986. – Vol. Mtt-34, № 10. – P. 1064 – 1076.
3. Osumi N., Ueno K. *Microwave Holographic Imaging of Underground Object* // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. – 1985. – Vol. AP-33, № 2. – P. 152 – 159.
4. Сухаревский О.И., Музыченко А.В., Сазонов А.З. Асимптотическое решение задачи рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем цилиндрическом объекте, погруженном в диэлектрическое полупространство // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2002. – Т. 7, № 1. – С. 28 – 36.
5. Сухаревский О.И., Музыченко А.В., Сазонов А.З. Асимптотическое решение задачи рассеяния электромагнитной волны на импедансном цилиндрическом объекте, погруженном в диэлектрическое полупространство // *Системы обработки інформації*. – 2004. – Вип. 8 (36). – С. 71 – 77.

Поступила 18.01.2005

Рецензент: доктор физико-математических наук, ст. научный сотрудник В.К. Иванов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.