

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.8>

УДК: 621.396.96

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАТОРОМ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е.Л. Шошин

Сургутский государственный университет, 628400, пр. Ленина, 1

Статья поступила в редакцию 2 мая 2022 г.

Аннотация. Проведен анализ эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) эталонных отражателей, заглубленных в грунт. Приведены диаграммы углового рассеяния металлических сфер при малом соотношении длины облучающего поля и радиуса сферы. Рассчитаны зависимости ЭПР металлических дисков от глубины погружения в ближней зоне облучения. Приведены радиолокационные изображения металлического диска, заглубленного в песок. Выполнен анализ влияния алгоритма синтеза апертуры и преобразования Гильберта на формирование выходного сигнала приемного тракта георадара. Разработана методика измерения ЭПР локального объекта, использующая измерения глубины погружения, уровня сигнала на выходе приемного тракта и данные внешней калибровки. Приведены результаты измерения ЭПР объектов цилиндрической формы.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, внешняя калибровка, эталонные отражатели, синтезирование апертуры, преобразование Гильберта.

Автор для переписки: Шошин Евгений Леонидович, shoshin6@mail.ru

Введение

При подповерхностном радиолокационном зондировании в качестве объектов исследования выступают структуры с неизвестными электрофизическими свойствами, в результате чего возникают отражения от границ раздела сред, обусловленные различием диэлектрической проницаемости и электропроводности [1,2]. Измерение временных и спектральных параметров рассеянных сигналов осуществляются методами стробоскопического приема и Фурье-анализа, что позволяет обнаруживать объекты, обладающие требуемыми признаками, определять глубину залегания и толщину геологических слоев [3,4]. Для идентификации локального объекта может использоваться его ЭПР, измерение которой сопряжено с влиянием почвогрунтов на уровень рассеянных сигналов. Чтобы исключить такое влияние необходимо выполнить калибровку георадара, используя заглубленные в грунт эталонные отражатели. Результаты калибровки, полученные для одной среды (например, песка), могут быть пересчитаны к другой среде (например, суглинка), используя погонное ослабление радиоволн.

Целями работы является анализ характеристик рассеяния металлических сфер и дисков, заглубленных в песок, исследование влияния алгоритма синтеза апертуры и преобразования Гильберта на формирование радиолокационного изображения локальных объектов в ближней зоне облучения и разработка методики измерения ЭПР локального объекта с использованием данных внешней калибровки.

1. Характеристики рассеяния металлических сферы и диска

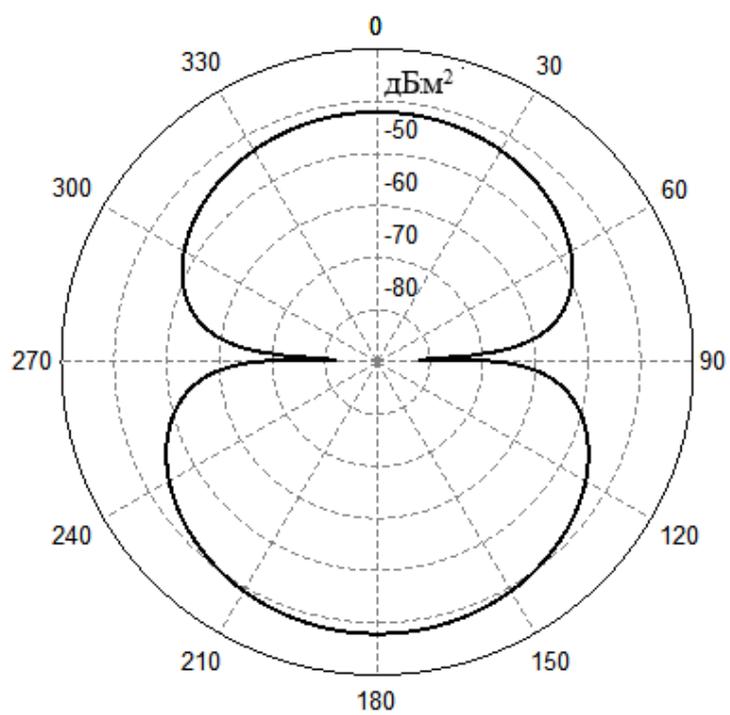
Целью внешней калибровки георадара является сопоставление измеренного уровня сигнала на выходе приемного тракта известному значению ЭПР эталонного отражателя. Скрытое расположение заглубленного в грунт эталонного отражателя затрудняет ориентирование передающей и приемной антенн георадара с поверхности земли при проведении калибровки. В этих условиях при проведении измерений потребуется одно или несколько

георадарных профилирований, в ходе которых будет измерен уровень сигнала, рассеянный отражателем в направлении основного лепестка диаграммы направленности приемной антенны. При проведении калибровки следует исключить искусственные отражатели (такие, например, как металлические пластины прямоугольной формы), которые демонстрируют зависимость своей ЭПР от направления, с которым передающая и приемная антенны при движении по поверхности земли пересекают место размещения отражателя.

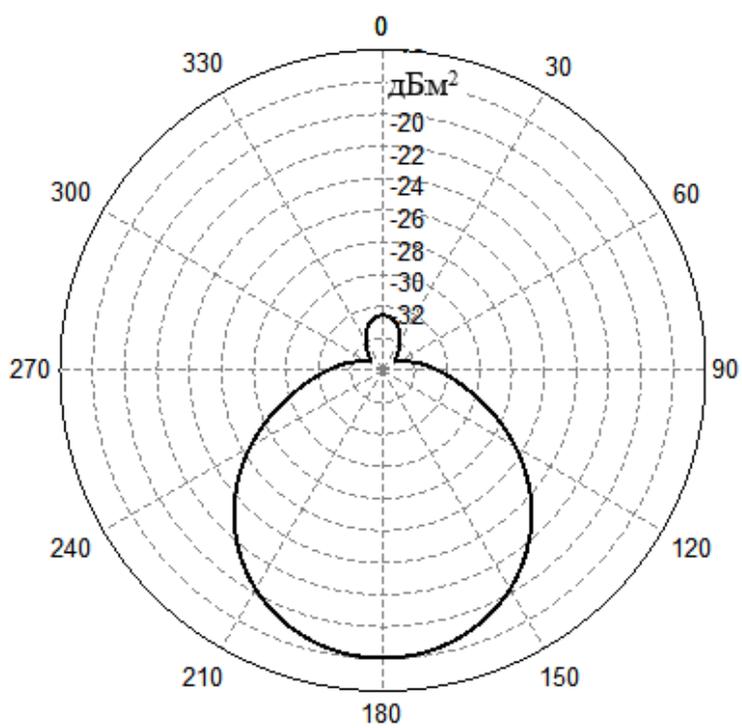
В качестве эталонных отражателей в подповерхностной радиолокации пригодны металлические сферы и диски, обладающие хорошими рассеивающими свойствами в границах верхней полусферы. Металлическая сфера одинаковым образом рассеивает радиоволны, падающие на неё с произвольного направления. ЭПР шара радиусом a , много большего длины волны облучающего поля λ , равна:

$$\sigma = \pi a^2 . \quad (1)$$

При $a \approx \lambda$ рассеяние сферой радиоволн приводит к проявлению резонансных явлений. На рис. 1, а-в приведены диаграммы углового рассеяния заглубленных в песок металлических сфер различных размеров, рассчитанные при радиолокационном зондировании на частоте 1,7 ГГц с помощью ФЕКО [5]. В таблице 1 приведены характеристики рассеяния металлических сфер (k – волновое число).



а)



б)

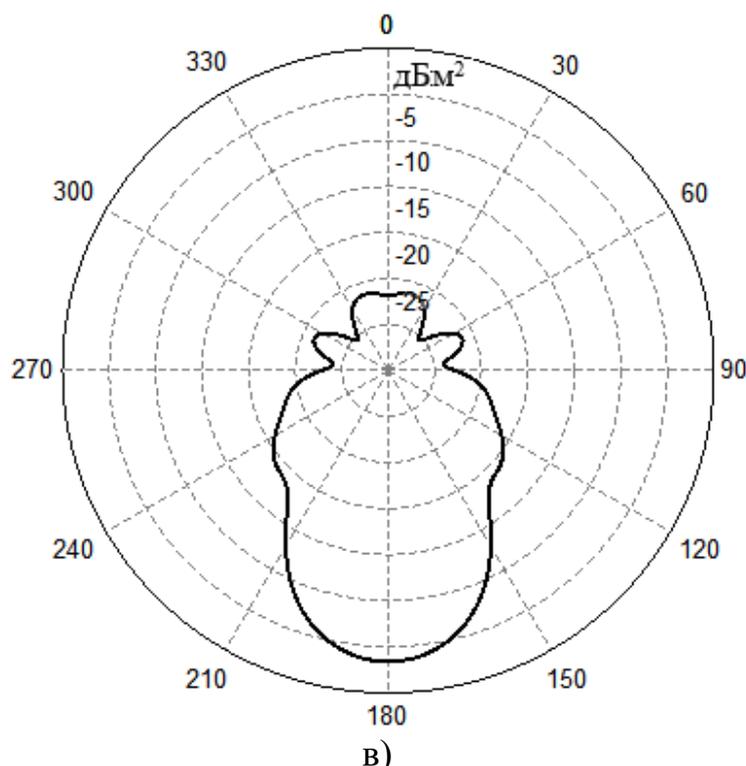


Рис.1. Диаграммы углового рассеяния металлических сфер:
 а) $a=1,3$ см; б) $a=2,9$ см; в) $a=6,5$ см

Таблица 1. Характеристики рассеяния металлических сфер

$a, \text{ см}$	ka	$\sigma, \text{ м}^2$	$\theta_{0,5}, \text{ град}$
1,3	1	0,0002	86
2,9	$\sqrt{5}$	0,025	70
6,5	5	1,45	34

При $a \approx \lambda$ теневое поле сферы мало, что приводит к малой ЭПР (рис. 1, а). При увеличении радиуса сферы её диаграмма углового рассеяния становится более направленной, уменьшается ширина углового рассеяния ($\theta_{0,5}$) и рассеивающие свойства сферы приближаются к свойствам изотропного отражателя (рис. 1, б- в).

Рассеяние радиоволн плоскими отражателями в ближней зоне облучения рассмотрено в [6]. При нормальном падении облучающих волн в атмосфере ЭПР металлического диска равна:

$$\sigma = 2\pi r^2 \left(1 - \cos\left(\frac{ka^2}{r}\right)\right), \quad (2)$$

где a – радиус; r – расстояние.

Заменяя в (2) волновое число значением $\sqrt{\varepsilon}k$, получим выражение для расчета ЭПР металлического диска при его заглублении в грунт:

$$RCS_o(\text{дБм}^2) = 20\log r + 10\log\left(1 - \cos\left(\frac{\sqrt{\varepsilon}k a^2}{r}\right)\right) + 8. \quad (3)$$

При проведении внешней калибровки диэлектрическая проницаемость грунта ε должна быть известна, что позволяет выбрать глубину погружения металлического диска и рассчитать RCS_o согласно (3).

На рис. 2 приведены зависимости ЭПР металлических дисков диаметром 20 см (1) и 32 см (2) от глубины погружения в песок ($\varepsilon = 4.5$) при облучении на частоте 1,7 ГГц. Рис. 2 свидетельствует о колебательном характере зависимости $RCS_o(r)$, приводящем к локальным максимумам и минимумам на малых глубинах. На глубинах $>0,8$ м ЭПР дисков принимают установившиеся значения, соответствующие условиям рассеяния радиоволн в дальней зоне. ЭПР дисков сохраняет свое значение при заглублении металлического диска в подповерхностной среде произвольного типа – песке, суглинке, торфе, бетоне и др.

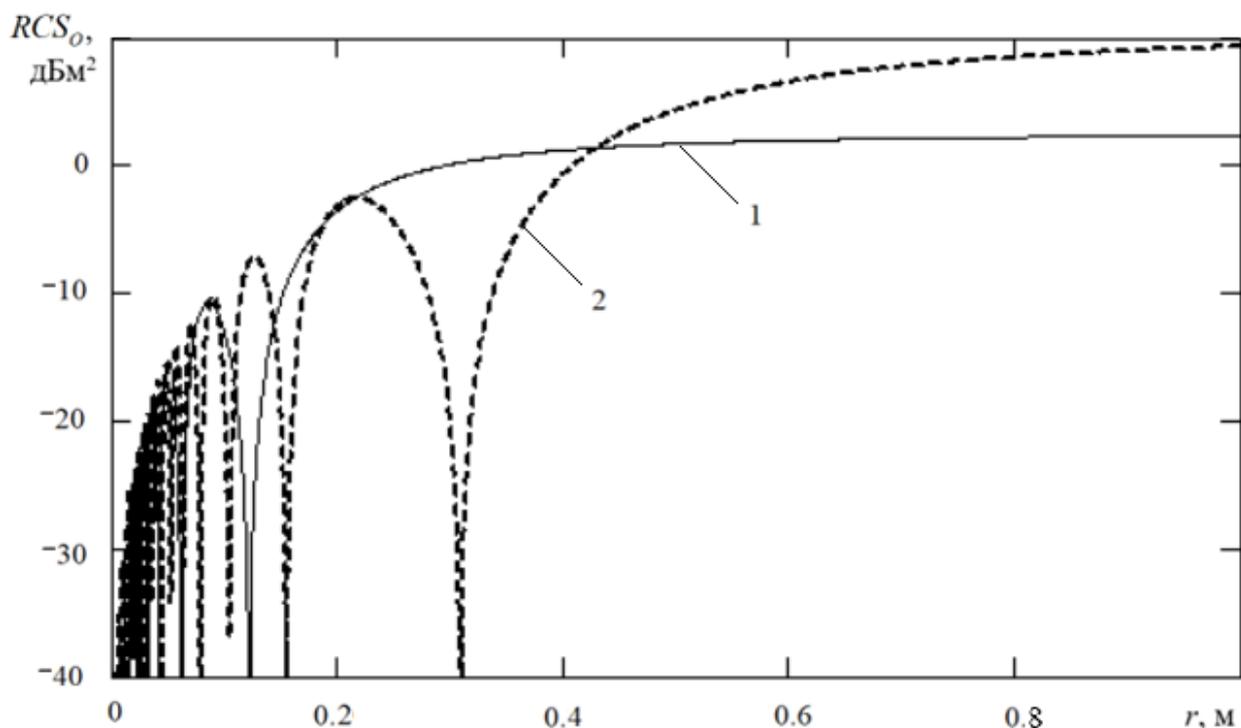


Рис. 2. Зависимость ЭПР металлического диска от глубины погружения в песок

В таблице 2 приведены характеристики рассеяния металлических дисков на глубине 0,2 м.

Таблица 2. Характеристики рассеяния металлических дисков

a , см	ka	σ , м ²	$\theta_{0,5}$, град
10	3.56	2,2	23.7
16	5.7	2,0	15

2. Формирование радиолокационного изображения локального объекта в ближней зоне облучения

На рис. 3 приведено радиолокационное изображение металлического диска диаметром 35 см, полученное путем профилирования георадаром ОКО с поверхности песка на центральной частоте 1,7 ГГц.

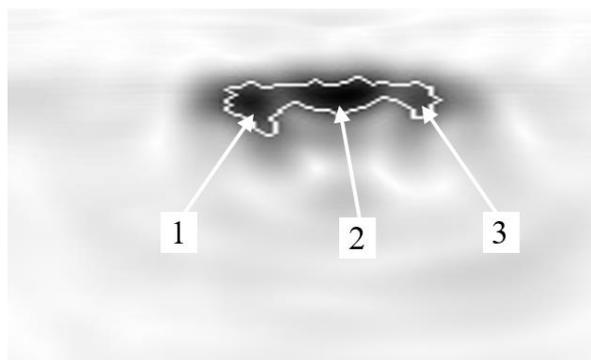


Рис. 3. Радиолокационное изображение металлического диска

Анализ рис. 3 свидетельствует о наличии выраженных областей рассеяния (1,2,3), сформированные в результате обработки рассеянных сигналов. Области рассеяния характеризуют ЭПР диска и формируются в результате последовательного выполнения операций:

- 4) георадарное профилирование диска с поверхности грунта, приводящее к формированию изображения годографа.

Положение вершины годографа и наклон гиперболических участков позволяют определить диэлектрическую проницаемость подповерхностной среды [3].

2) усиление сигнала приемником с коэффициентом g (дБ) для компенсации затухания, вносимого подповерхностной средой:

$$g \geq 2 \Gamma r, \quad (4)$$

где Γ – погонное затухание, дБ/м.

3) реализация алгоритма синтеза апертуры, преобразующего радиолокационное изображение годографа в яркостное изображение диска благодаря обработке данных, полученных при движении передающей и приемной антенн [3].

При движении георадара по поверхности грунта вдоль выбранной линии задержка рассеянных сигналов изменяется по гиперболе, что позволяет построить процедуру взвешенного гиперболического суммирования сигналов при приеме, уменьшая угловую ширину и увеличивая радиолокационный контраст изображения металлического диска на величину, равную отношению сигнал/помеха (w).

4) преобразование Гильберта, трансформирующее радиолокационное изображение осей синфазности диска в полутоновое изображение огибающей аналитического сигнала:

$$z_O(t) = |x(t) + jy(t)|, \quad (5)$$

где $x(t)$ – рассеянный сигнал,

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

$y(t)$ – сопряженный сигнал.

На рис. 4 приведены радиолокационные изображения, полученные георадаром ОКО при зондировании металлического диска, погруженного в песок на глубину 20 см.

Радиолокационное изображение на рис. 4, а представляет собой годограф с угловой шириной в 132° , аппроксимация которого гиперболой позволяет определить диэлектрическую проницаемость песка, равную 4.5 [3]. Реализация алгоритма синтеза апертуры приводит к формированию изображения металлического диска (рис.4, б), угловая ширина которого составляет 91° благодаря трансформации энергии гиперболических участков в энергию вершины годографа. Определим улучшение отношения сигнал/помеха, которое связано с увеличением мощности сигнала при реализации алгоритма

синтезирования апертуры антенны. Считая, что угловая ширина радиолокационного изображения диска равна ширине основного лепестка диаграммы направленности приемной антенны, определим сужение основного лепестка диаграммы направленности, обусловленное синтезированием апертуры: $132/91=1,45$. Это в свою очередь приводит к увеличению радиолокационного контраста изображения диска на $20\log(1,45) = 3,2$ дБ.

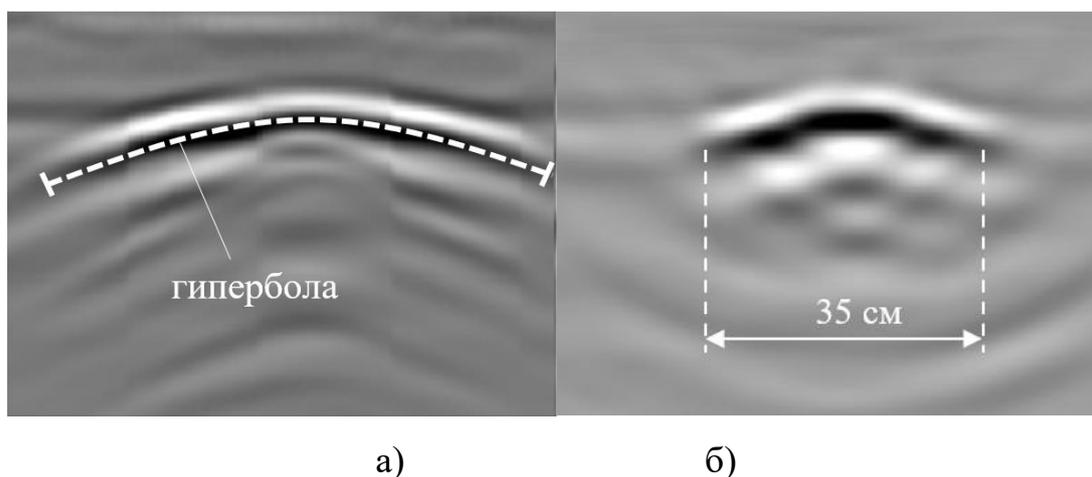


Рис. 4. Радиолокационные изображения металлического диска: а) до реализации алгоритма синтеза апертуры; б) после реализации алгоритма синтеза апертуры

Преобразование Гильберта видоизменяет радиолокационное изображение металлического диска и приводит к формированию центров рассеяния с уровнем аналитического сигнала $z_O(t)$, пропорциональным ЭПР. В качестве примера реализации преобразования Гильберта рассмотрим рассеянный сигнал, формируемый георадаром ОКО при облучении локальных объектов [7]:

$$x(t) = mU_0 (\exp(-(\alpha + \beta)t) - \exp(-\alpha t)) \cos(2\pi f_0 t) , \quad (7)$$

где U_0 – амплитуда; m , α , β – коэффициенты; f_0 – центральная частота зондирующего сигнала. В свою очередь амплитуда рассеянного радиосигнала, после усиления в приемнике и реализации алгоритма синтеза апертуры равна:

$$U_0 = \sqrt{P_{np} R_n} \cdot 10^{0,05(g+w)} , \quad (8)$$

где P_{np} – мощность рассеянного сигнала; R_n – сопротивление нагрузки.

На рис. 5 приведены: сигнал $x(t)$, соответствующий рассеянию металлическим диском при следующих условиях: $f_0 = 1.7$ ГГц, $P_{np} = 0.1$ мкВт,

$R_{\text{н}} = 50 \text{ Ом}$, $g + w = 60 \text{ дБ}$, $\alpha = 2.4 \cdot 10^9$, $\beta = 8 \cdot 10^9$, $m = 2.24$ и сигналы $y(t)$, $z(t)$, рассчитанные согласно (6) и (5). Рис. 5 свидетельствует, что огибающая аналитического сигнала описывается функцией $m \exp(-(\alpha + \beta)t - \exp(-\alpha t))$, максимум которой превышает амплитуду рассеянного сигнала на 10%, так что $z_0 = 2,46 \text{ В}$.

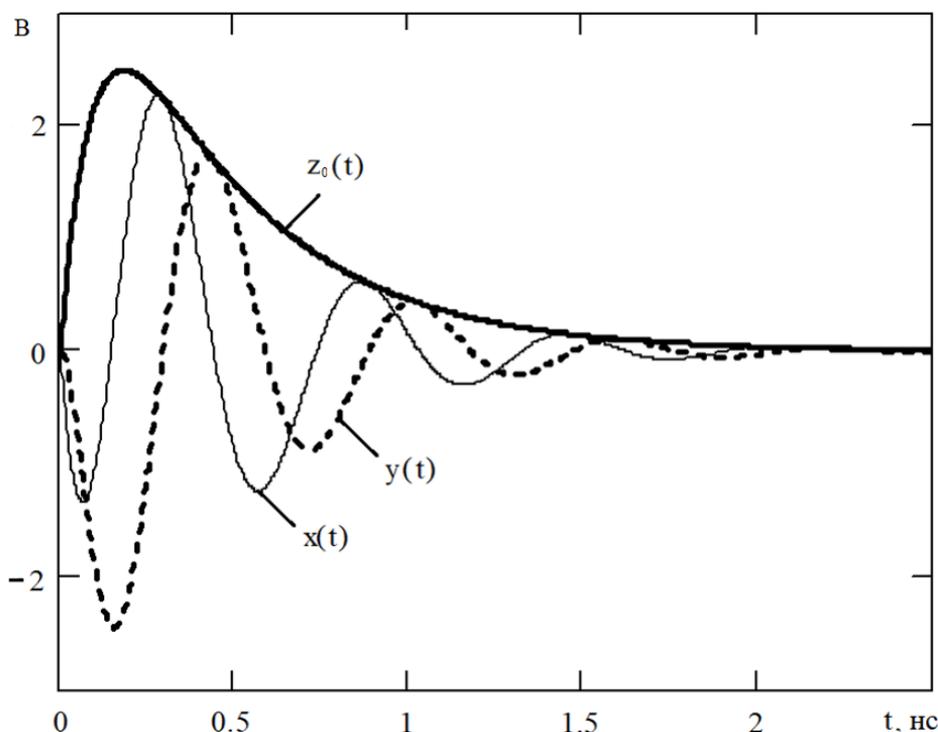


Рис.5. Преобразование Гильберта рассеянного сигнала

3. Измерение ЭПР локальных объектов

Энергетические характеристики георадара и ЭПР локального объекта σ связаны между собой при помощи уравнения радиолокации [8]:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \frac{V_1}{4\pi r_1^2} \sigma \frac{V_2}{4\pi r_2^2} \frac{G_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi}, \quad (9)$$

где $P_{\text{пр}}$ – мощность принятого сигнала; $P_{\text{пер}}$ – мощность излучения; $G_{\text{пер}}$ и $G_{\text{пр}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны; $\eta_{\text{пер}}$ и $\eta_{\text{пр}}$ – КПД передающей и приемной антенны; r_1 и r_2 – расстояние от передающей антенны к рассеивающему объекту и от рассеивающего объекта до приемной антенны; V_1 и V_2 – энергетические и поляризационные потери от передающей антенны в

рассеивающему объекту и от рассеивающего объекта к приемной антенне; λ – длина волны облучающего сигнала.

Используя (8) и (9), выразим ЭПР локального объекта при $r_1 = r_2 = r$, $G_{nep} = G_{np} = G$, $\eta_{nep} = \eta_{np} = \eta$ и $V_1 = V_2 = V$:

$$\sigma = \frac{U_0^2 10^{-0,1(g+w)} r^4}{V^2 G^2} h, \quad (10)$$

где

$$h = \frac{(4\pi)^3}{P_{nep} \eta^2 \lambda^2 R_n}, \quad (11)$$

h – параметр, учитывающий характеристики георадара. При подповерхностном радиолокационном зондировании коэффициент усиления приемной и передающей антенн G оказывается зависящим от свойств почвогрунтов [3,9]. Эталонный отражатель с известным RCS_O , погруженный на глубину r_O , формирует сигнал с уровнем z_O на выходе приемного тракта георадара. Локальный объект, залегающий на глубине r , формирует сигнал с уровнем z на выходе приемного тракта георадара. ЭПР локального объекта равна:

$$RCS(\text{дБм}^2) = 20 \log\left(\frac{z}{z_O}\right) + 40 \log\left(\frac{r}{r_O}\right) - 20 \log\left(\frac{G}{G_O}\right) - 2(\Gamma r - \Gamma_O r_O) + RCS_O, \quad (12)$$

где G_O и G – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны, соответствующие условиям подповерхностного радиолокационного зондирования эталонного отражателя и локального объекта соответственно; Γ_O и Γ – погонное затухание радиоволн в грунте при измерении уровней сигналов, рассеянных эталонным отражателем и локальным объектом соответственно.

Методика измерения ЭПР включает в себя внешнюю калибровку георадара и последующее измерение параметров r и z при подповерхностном радиолокационном зондировании локального объекта, после чего определяется коэффициент усиления антенн G с учетом типа грунта и его влажности [10] и формируется оценка RCS согласно (12).

В таблице 3 приведены результаты измерения ЭПР объектов цилиндрической формы при их поперечном профилировании георадаром ОКО в

диапазоне частот 0,7 ГГц и 1,7 ГГц с поверхности бетонной плиты и грунта. В качестве калибровочного отражателя использовались металлические диски диаметром 20 см и 35 см.

Таблица 3. Характеристики рассеяния объектов цилиндрической формы

Объект и среда	a , см	f_0 , ГГц	Γ , дБ/м	RCS , дБм ²
стержни арматуры в бетонной плите	0,6	1,7	19	-17,2
пластиковая труба в песке	2,0	1,7	13	-36,7
стальная труба в суглинке	2,1	0,7	35	-11,5
	5,0	0,7	32	-8,2
	8,2	0,7	38	-6,1

Заключение

Металлические сферы и диски обладают рассеивающими свойствами эталонных отражателей и могут использоваться при проведении внешней калибровки георадара. При радиусе металлического шара, сравнимого с длиной волны облучающего поля, ширина диаграммы углового рассеяния близка к 90° . При увеличении радиуса сферы диаграмма углового рассеяния принимает все более направленный характер. В ближней зоне облучения металлических дисков проявляются локальные максимумы и минимумы зависимости ЭПР от глубины погружения.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что реализация алгоритма синтезирования апертуры и преобразования Гильберта приводит к формированию радиолокационного изображения металлического диска, включающему преимущественные области рассеяния. Уравнение подповерхностной радиолокации устанавливает связь между ЭПР локального объекта и уровнем выходного сигнала приемного тракта.

Методика измерения ЭПР включает в себя измерение глубины погружения и уровня выходного сигнала приемного тракта при подповерхностном радиолокационном зондировании локального объекта, после чего определяется коэффициент усиления антенн с учетом типа грунта и его влажности и формируется оценка RCS с использованием данных внешней калибровки. ЭПР металлических локальных объектов цилиндрической формы при изменении диаметра от 0,6 см до 8,2 см составляет $-17.2 \dots -6.1$ дБм².

Литература

1. Александров П.Н. *Теоретические основы георадарного метода*. Москва, Физматлит. 2017. 120 с.
2. Annan P., Arcone S.A., etc. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science. 2009. 508 p.
3. Андриянов А.В. и др. *Вопросы подповерхностной радиолокации*. Москва, Радиотехника. 2005. 413 с.
4. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. *Теория и методы георадиолокации: учебное пособие*. Москва, Горная книга, МГУ. 2008. 196 с.
5. Банков С.Е., Курушин А.А. *Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO*. Москва, НПП «РОДНИК». 2009. 200 с.
6. Pouliguen P., Nemon R., Bourlier C., Damiens J.F. etc. Analytical formulae for radar cross section of flat plates in near field and normal incidence. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2008. V.9. P.263-279.
7. Шошин Е.Л., Лукьянов С.П. Ковалев, Д.М. *Георадарные методы инженерного обследования*. Ханты-Мансийск, Полиграфист. 2008. 152 с.
8. Ruck G.T., Barric D.E., Stuart W.D., Krichbaum C.K. *Radar Cross Section, Handbook*. N.Y, Plenum Press. 1970. V.1. 472 p.
9. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин, В.Н. *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1994. 215 с.

10. Лукьянов С.П. Степанов Р.А. Шошин Е.Л. Влияние почвогрунтов на диаграмму направленности антенны Вивальди при подповерхностном зондировании. *Материалы IV общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания широко-полосных радио-электронных систем (СВЧ2012)»*. Омск, полиграфический центр КАН. 2012. 235-241с.

Для цитирования:

Шошин Е.Л. Измерение эффективной поверхности рассеяния локальных объектов радиолокатором подповерхностного зондирования *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.8>